

**ТРАНСПОРТ**  
**НАУКА, ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ**  
**НАУЧНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК**  
**TRANSPORT**  
**SCIENCE, EQUIPMENT, MANAGEMENT**  
**SCIENTIFIC INFORMATION COLLECTION**

Издается с 1990 г.

№ 6

Москва 2020

Научный информационный сборник «ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление» включен в новый ПЕРЕЧЕНЬ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидатов наук, на соискание ученой степени докторов наук (Перечень ВАК). Действует с 28.12.2018 г.

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>Белый О.В., Барина Л.Д., Забалканская Л.Э.</b> Методы обеспечения безопасности на автомобильных дорогах в зимний период .....	3
<b>Лазарева Т.Л., Ярмолинская Н.И.</b> Оптимизация состава холодной асфальтобетонной смеси с целью повышения эффективности ремонтных работ на автомобильных дорогах Юга Дальнего Востока.....	9
<b>Илесалиев Д.И., Сатторов С.Б., Махматкулов Ш.Г.</b> Обоснование этапности развития железнодорожного участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская .....	15
<b>Доможирова А.Д., Гончарова Н.Ю., Упырь Р.Ю.</b> Исследование надежности эксплуатационной работы железнодорожной линии на горно-перевальном участке .....	24
<b>Тиверовский В.И.</b> Новые технологии, системы и напольный транспорт в логистике .....	28
<b>Жук А.С.</b> Модель движения судна по программе выхода в путевую точку.....	32
<b>Филимонова И.В., Немов В.Ю., Проворная И.В., Дзюба Ю.А.</b> Перспективы сотрудничества восточносибирских регионов России и стран Азиатско-Тихоокеанского региона в сфере транспортировки нефти и газа .....	37
<b>Бедрицкий И.М., Жураева К.К.</b> Оценка погрешностей расчета ферромагнитных элементов, используемых в параметрических стабилизаторах транспортных средств.....	48
<b>Иванов Д.А., Коваленко Г.В.</b> Влияние обработки пульсирующими дозвуковыми газовыми потоками на механические свойства термоупрочняемых элементов конструкции воздушных судов.....	53
Информация для авторов .....	57

## CONTENTS

<b>O.V. Bely, L.D. Barinova, L.E. Zabalkanskaya</b> Methods to Ensure Road Safety during Winter.....	3
<b>T.L. Lazareva, N.I. Yarmolinskaya</b> Optimization of the Composition of Cold Asphalt-Concrete Mixture in order to Increase the Efficiency of Repair Works on the Roads in the South of the Far East.....	9
<b>D.I. Ilesaliev, S.B. Sattorov, M.G. Shakhobiddin</b> Substantiation of the Phased Development of Ahangaran-Tukimachi-Syrdarya Railway Route.....	15
<b>A.D. Domozhirova, N.Yu. Goncharova, R.Yu. Upyr</b> Research of Reliability of a Railway Line in the Mountain Pass Section.....	24
<b>V.I. Tiverovsky</b> State-of-the-Art Technologies, Systems and Floor Vehicles in Logistics.....	28
<b>A.S. Zhuk</b> Ship Motion Model Based on the Program of Waypoint Following.....	32
<b>I.V. Filimonova, V.Yu. Nemov, I.V. Provornaya, Yu.A. Dzyuba</b> Prospects for Cooperation of East Siberian Regions of Russia and Countries of Asian-Pacific Region in Oil and Gas Transport.....	37
<b>I.M. Bedritskiy, K.K. Zhurayeva</b> Estimation of Errors in Calculations of Ferromagnetic Elements of the Parametric Stabilizers of Vehicles.....	48
<b>D.A. Ivanov, G.V. Kovalenko</b> Influence of Treatment by Pulsating Subsonic Gas Flows on the Mechanical Properties of Heat-Strengthened Aircraft Structural Elements.....	53
Information for autors.....	57

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ СБОРНИКА

(по состоянию на 20.01.2020 г.)

Наукометрический показатель	Значение
Двухлетний импакт-фактор в РИНЦ	0,635
Двухлетний импакт-фактор с учетом цитирования из всех источников	0,901
Пятилетний импакт-фактор в РИНЦ	0,277
Число статей за год в РИНЦ	143

Сборник занимает 42-е место в рейтинге SCIENCE INDEX по тематике «Транспорт».

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Доктор техн. наук, профессор **Белый О.В.**,  
кандидат техн. наук, доцент **Барина Л.Д.**,  
кандидат физ.-мат. доцент **Забалканская Л.Э.**  
(Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук)

## METHODS TO ENSURE ROAD SAFETY DURING WINTER

**O.V Bely**, Doctor (Tech.), Professor,  
**L.D. Barinova**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
**L.E. Zabalkanskaya**, Ph.D. (Phys. & Math.), Associate Professor  
(St.Petersburg Research Center of RAS)

*Безопасность, автомобильные дороги, антигололёдные средства, эффективность, негативное воздействие, природная среда.*

*Road safety, anti-icing/deicing agents, operational effectiveness, environment impact.*

*Обеспечение безопасности передвижения по автомобильным дорогам в холодное время года во многом зависит от состояния дорожного покрытия. В статье проанализирован российский и международный опыт применения различных методов и материалов, применяемых для борьбы с гололёдом на автомобильных дорогах, перечислены их достоинства и недостатки с точки зрения эффективности воздействия и экологической безопасности.*

*Safety of road travel during the cold season depends significantly on the condition of the pavement. The article analyses Russian and International experience in the application of anti-icing and deicing agents. Their advantages and disadvantages are considered in terms of impact efficiency and environmental safety.*

В настоящее время в Российской Федерации объёмы перевозок автомобильным транспортом непрерывно возрастают. При этом именно автомобильный транспорт вносит наиболее существенный вклад в показатели аварийности, увеличивая ущерб от транспортной деятельности. Безопасность перевозок автотранспортом во многом определяется состоянием автомобильных дорог. Так, по данным ГИБДД, за январь-июнь 2019 г. в России произошло 27 тыс. дорожно-транспортных происшествий (ДТП) из-за неудовлетворительного состояния дорожного покрытия, в которых погибли 2295 человек [1]. В зимнее время, особенно в северных регионах России, короткий световой день или его отсутствие, а также туманы и осадки ухудшают видимость, поэтому необходимо особенно тщательно предотвращать образование наледи, удлиняющей тормозной путь. В разных странах мира зимняя скользкость является причиной до 40 % ДТП [2].

Следует отметить, что большинство специалистов сходятся во мнении о том, что своевременная механическая очистка дорог и улиц с применением совершенной техники является одним из наиболее эффективных способов борьбы с гололёдом и снежным покровом в зимний период. Однако зачастую этого бывает недостаточно, поэтому применяются различные методы борьбы с наледью, в том числе и предотвращающие её появления. Рассмотрим более подробно преимущества и недостатки различных методов, учитывая их эффективность (в том числе и экономическую) и экологическую безопасность.

Применение антигололёдных материалов, позволяющих обеспечить надлежащее состояние автодорог между циклами механической уборки, началось с середины XX века (в Швеции с 1947 г., в Великобритании с 1960 г., в России с 1966 г.). Первоначально применялись мелкие фракции песка, затем стали добавлять техническую соль - галит (NaCl), вначале в небольших количествах, а затем все нормы были превышены. Позднее стали применять наряду с хлоридами натрия, хлориды магния и кальция. Все эти соли обладают свойством понижать точку плавления снега.

Противогололёдные материалы (ПГМ) по своему действию можно разделить на противогололёдные реагенты (ПГР) и фрикционные материалы. Применяются также смеси из нескольких химических веществ. Как правило, они являются более эффективными. Например, смесь хлоридов натрия (NaCl) и кальция (CaCl<sub>2</sub>) может быть применена при более низких температурах, чем NaCl, поскольку CaCl<sub>2</sub> адсорбирует влагу из внешней среды, выделяя тепло, увеличивая, таким образом, скорость растворения NaCl [3].

При высокой интенсивности движения фрикционные материалы плохо закрепляются на проезжей части, поэтому они применяются в прогретом состоянии или в составе комбинированных ПГМ ( ПГР и фрикционные материалы одновременно). Так, например, Alaska Fish SAFE STEP состоит из мраморной крошки и морской соли высокой очистки, а Alaska Fish STANDART – из NaCl и очищенного речного песка [4].

Следует отметить, что готовые пескосоляные смеси, как правило, хранятся на открытых площадках, которые являются дополнительным источником загрязнения окружающей природной среды, поскольку с мест хранения химические реагенты проникают в поверхностные и подземные воды, а также разносятся ветром, в результате чего может быть нанесён ущерб различным экосистемам. Для минимизации негативного воздействия, при невозможности закрытого хранения, необходимо учитывать природные и метеорологические особенности при выборе мест открытого складирования ПГМ.

Все химические ПГМ, применяемые для борьбы с зимней скользкостью на дорогах и улицах, должны, с одной стороны, снижать силы смерзания слоев отложений с дорожным покрытием и обеспечивать таяние снежно-ледяных отложений на них, а с другой стороны не увеличивать скользкость обработанных дорожных покрытий, не способствовать разрушению дорожного покрытия и не оказывать вредного влияния на природную среду [5].

В качестве ПГМ используются хлориды ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{MgCl}_2$ ), ацетаты и формиаты (калия и аммония), карбамиды и нитраты (на основе нитрата кальция, магния и мочевины), применяемые в твёрдом, жидком и увлажнённом состоянии. Согласно введённым в России нормативным документам ПГМ должны быть умеренно или малоопасными веществами (3 или 4 класса опасности) по воздействию на человека. Хлориды натрия и кальция относятся к 3 классу опасности, в то время как формиат натрия (соль муравьиной кислоты) относится к 4 классу.

Многочисленные исследования, проводимые в различных странах мира, показали, что использование  $\text{NaCl}$  в увлажнённом состоянии вместо сухой соли имеет ряд существенных преимуществ, таких как:

- более равномерное распределение и лучшее прилипание к поверхности дорожного покрытия, что даёт более длительный эффект;
- возможность использования при более низких температурах;
- сокращение времени высыхания покрытия, что обеспечивает существенный экономический эффект за счёт снижения расхода соли в среднем на 14 %, смеси песка с солью - в 8 раз [6].

Применение ПГР вызывает различные негативные последствия. Коррозионная активность ПГР и их негативное влияние на качество различных покрытий и прочность материалов влияют на состояние безопасности. Кроме того, наблюдается негативное воздействие на экосистемы и здоровье человека. По данным исследований, проводимых в МГУ (Геологический факультет), определены следующие негативные эффекты [7]:

- повышение уровня электропроводности почв, что приводит к усилению коррозии трубопроводов, свай домов и арматуры;
- увеличение износа асфальтового покрытия дорог и других конструктивных элементов, особенно на мостах и эстакадах, поскольку ПГР имеют высокую коррозионную активность по отношению к стали, а также способны растворять некоторые компоненты битумов;
- изменение физико-механических свойств грунтов (рост фильтрационной способности грунтов, что

увеличивает опасность проявления суффозионных процессов);

- заметное угнетение растительности по обочинам дорог;
- негативное влияние на здоровье людей, поскольку вдыхание паров от обработанной поверхности провоцирует и усугубляет заболевания легких;
- непосредственный контакт с ПГР оказывает негативное воздействие на кожу животных и человека.

Наибольшую коррозионную активность по отношению к стальным конструкциям проявляют хлориды магния ( $1,29 \text{ мг/см}^2\text{-сутки}$ ), кальция ( $1,02 \text{ мг/см}^2\text{-сутки}$ ) и натрия ( $0,8 \text{ мг/см}^2\text{-сутки}$ ). В связи с этим, согласно ОДМ 218.5.006-2008 «Методические рекомендации по применению экологически чистых антигололёдных материалов и содержанию мостовых сооружений» [8] использование на мостовых сооружениях хлорсодержащих реагентов запрещено. Для борьбы с гололедом на этих конструктивных элементах автодорог должны применяться материалы на основе ацетатов, нитратов, формиатов и карбамидов. На тех участках автомагистралей, где использование хлоридных реагентов не запрещено, к ним следует добавлять ингибиторы коррозии. При этом выбирают такие ингибиторы коррозии, которые сами по себе обладают противогололёдными свойствами. Так, например, многокомпонентные ПГР с использованием формиатов (солей муравьиной кислоты), имеют высокую плавящую способность и низкую коррозионную активность ( $0,14 \text{ мг/см}^2\text{-сутки}$ ) [11]. К их преимуществам следует также отнести то, что формиаты не обладают резким запахом, не вызывают аллергических реакций и раздражений кожных покровов у животных и человека и не обладают хронической токсичностью. Поэтому использование формиата натрия вместе с хлоридами в составе ПГМ позволяет снизить класс их опасности. Кроме того, необходимо упомянуть, что, формиаты стимулируют активность полезных аэробных бактерий в почве, что ускоряет процесс разложения других примесей, поступающих с проезжей части с талым снегом [5].

При рассмотрении вопросов экологической безопасности, следует обратить внимание на то, что ПГР с тротуаров и снегоплавильных установок проникают в различные природные среды. Эти вещества загрязняют наземные и, через почву, подземные воды, а также воздух (через канализационные стоки они попадают на очистные сооружения, осадок которых сжигается, выделяя в воздух диоксины, ПАУ и др. экотоксиканты).

Исследования по изучению токсичности различных ПГМ показали, что все они оказывают негативное воздействие (зависящее от концентрации) на биоту. При этом зафиксировано превышение ПДК химических компонентов, входящих в состав антигололёдных препаратов, в воде непосредственно у обочины проезжей части в 1,2-2,8 раз [10].

В этой связи проводились многочисленные исследования по выбору тех или иных ингредиентов для создания антигололёдных смесей, обладающих наименее токсичным действием, и их ПДК. В качестве альтернативы хлористому натрию предложен хлористый магний (бишофит) - природный минерал, содержащий в своем составе хлоридно-натриево-магниевые составляющие, а также бром, йод, железо. ПГМ на его основе могут быть как твёрдые, так и жидкие. Поскольку он содержит большое количество различных веществ, их воз-

действие и накопление в почве и других средах неоднозначно. Однако, по сравнению с хлористым натрием, этот материал имеет такие преимущества как более широкий диапазон рабочих температур (от 0 до  $-35^{\circ}\text{C}$ ), более высокую скорость плавления льда (выше в 2-5 раз). А по сравнению с технической солью - низкие нормы расхода (от 20 г на квадратный метр), отсутствие соляного налета, меньшее вредное воздействие на окружающую среду. При этом отмечается снижение его качеств при смешении с другими солями.

Ещё одним достаточно популярным средством является модифицированный хлористый кальций (ХКМ 28%-ный), который расходуется более экономно и может использоваться при более низких температурах (до  $-55^{\circ}\text{C}$ ). Кроме того, он менее негативно воздействует на придорожные экосистемы, поскольку при его попадании в почву происходит замещение натрия, накопившегося в почве за период применения технической соли, кальцием. Однако одним из наиболее важных недостатков данного средства является его короткое время воздействия (примерно три часа), что ведет к необходимости проводить повторные обработки дорожного покрытия, что нивелирует эффект от снижения потребления на одну обработку. Также специалисты МАДИ выявили, что при обработке ледяного покрытия дороги ХКМ, качество сцепления шин с дорожным покрытием уменьшается на 30% при сравнении с мокрым асфальтом.

Жидкие ПГР применяются, как правило, в превентивных целях, такая обработка препятствует образованию наледи.

«Нордикс-П» представляет собой жидкость на основе солей или эфиров уксусной кислоты, благодаря чему решается проблема борьбы с ледяным слоем, толщина которого сравнима с неровностями поверхности. Для распределения данного реагента применяются специализированные разбрызгиватели. В зависимости от погодных условий до повторного нанесения может проходить до 4-х суток.

ПГМ на основе ацетатов, такие как СМА торговой марки Cryotech (USA), с 1986 г. применяются для предотвращения образования уплотненного снега и сцепления льда с дорожным покрытием, что облегчает механическую уборку снега и льда. Компания Cryotech производит как жидкие ПГМ (Cryotech CF7<sup>®</sup>), так и гранулированный кальций-магниевого ацетат Cryotech СМА<sup>®</sup>. CF7 используется как до начала осадков для предотвращения образования наледи, так и для борьбы с уже образовавшейся ледовой коркой. Кроме того, жидкость CF7 эффективна в качестве добавки при смазывании твёрдых ПГМ, поскольку, учитывая низкую точку замерзания (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ), значительно улучшает характеристики твердых веществ. Ещё одним достоинством этой жидкости является то, что благодаря низкой вязкости, она не засоряет распылительные форсунки, даже при очень низких температурах. [11].

Преимуществом жидкого реагента «Ацедор», также является его низкая коррозионная активность. Он изготавливается на основе солей уксусной кислоты и содержит смесь ацетатов магния, калия и кальция. Поскольку данные вещества используются для подкормки растений, их негативное влияние на почвы и почвенные микроорганизмы ниже, чем у многих ПГР. Более того, увеличивается биологическая активность почвенной биоты, что ускоряет разложение других экотоксикантов [12].

Для снижения потребления солей в антигололёдных растворах используются также побочные продукты и отходы сельскохозяйственной, пищевой и ликероводочной промышленности (свекольный и картофельный соки, продукты переработки сахарного тростника и мочевины). Проведённые в Канаде и США исследования выявили, что добавление сока сахарной свеклы, содержащего собственные кислоты, и картофельного сока, который является побочным продуктом при производстве водки, способствует повышению эффективности антигололёдной обработки. Преимуществом этих веществ является не только их биоразлагаемость, но и меньшая коррозионная активность. Мочевина, применяемая в сельском хозяйстве как удобрение, также используется для ПГМ в тех районах, где эти удобрения производятся [13].

Переходя к вопросу о фрикционных материалах, отметим, что они должны иметь следующие свойства [5]:

- большое сопротивление сжатию, дроблению, шлифованию и ударным нагрузкам (препятствует измельчению до пылевидных частиц);
- остроугольную форму частиц (снижает их снос с проезжей части автодороги);
- темный цвет (повышает поглощение солнечной энергии);
- одинаковый размер частиц (обеспечивает равномерное распределение по поверхности).

В качестве фрикционных материалов используется песок и смесь песка со щебнем, а также гранитная и мраморная крошка [14].

Исследования, проведенные ФГУП «РосДорНИИ», показали, что применение крупных и средних песков повышает сцепные свойства на 16 % больше, чем мелкие пески. Кроме того, было установлено, что фрикционные свойства покрытия, обработанного средним или крупным песком, сохраняются на поверхности в 3 - 4 раза дольше, чем при обработке мелким песком. Однако следует учесть, что находясь на проезжей части, песок перемалывается, что делает его повторное применение менее эффективным. Исследования, проведенные в Канаде, позволили установить, что при движении транспорта со скоростью 50 – 60 км/ч уже после проезда 10 – 15 автомобилей по обработанному песком покрытию скользкость увеличивается, а через 15 – 20 мин. коэффициент сцепления колеса со скользкой дорогой становится таким же, каким он был до ее обработки [15].

Применение гранитной крошки, в силу её твёрдости, повышает скорость износа дорожного покрытия, а также шин и других деталей автотранспорта. Кроме того, повреждение лакокрасочного покрытия провоцирует коррозию кузова автомобилей, снижая его срок службы.

Мраморная крошка не наносит такой ущерб дорожному покрытию и различным деталям механизмов автотранспорта, поскольку является более мягкой, чем гранитная, но при этом гораздо быстрее истирается. Мрамор, попадая в почву, полностью разлагается за 2-3 года, однако мраморная крошка также является носителем других загрязнителей, оседающих на поверхности дорог.

Применяются также различные комбинированные ПГМ. Так, например, твёрдый Cryotech СМА<sup>®</sup>, представляющий собой смесь доломитовой извести и уксусной кислоты. Рекомендуются Федеральным управлением автомобильных дорог США как альтернатива дорож-

ной соли, благодаря низкой коррозионной активности, низкой токсичности и способности к биоразложению. Может также использоваться как ингибитор коррозии при добавке к технической соли, при этом повышается эффективность использования смеси. [11]

Рассматривая фрикционные материалы с экологической точки зрения, следует отметить, что их применение вызывает усиление процесса истирания шин и покрытия автодорог, что способствует более интенсивному загрязнению воздушной среды твёрдыми частицами  $\text{ТЧ}_{2,5}$  и  $\text{ТЧ}_{10}$ , которое признано ВОЗ одним из негативных факторов, существенно влияющих на здоровье населения [16]. Поэтому все фрикционные материалы требуют своевременной уборки после зимнего периода. Повторное применение фрикционных материалов возможно только после предварительной очистки от загрязнителей (в том числе тяжёлых металлов и бензапирена), которые они впитывают, находясь на поверхности автодороги. Процесс очистки требует соответствующих энергозатрат, и также является источником образования загрязнённых стоков и токсичных отходов, требующих захоронения.

Одним из наиболее перспективных направлений обеспечения надлежащего состояния автомобильных дорог при отрицательных температурах является предотвращение образования ледяной корки за счёт внесения антигололёдных добавок при создании асфальтобетонного покрытия. Однако для поддержания надлежащего состояния покрытия при низких температурах воздуха этого недостаточно, поэтому этот метод применяется в сочетании с механической уборкой, кроме того, дополнительно могут быть использованы ПГР.

Добавка в асфальтобетонную смесь «Verglimit» используется в таких странах как Швейцария, Австрия, Германия, Франция, Швеция, Норвегия, Канада и США при асфальтировании наиболее опасных участков автодорог. В её состав входят хлорид кальция (80 %) и гидроксид натрия (5 %), а также другие элементы (каустическая сода и т.д.) для снижения коррозионной активности и скорости вымывания хлорида из дорожного покрытия. Гранулы антигололёдной добавки покрываются пленкой полимеризованного льняного масла для их защиты от воздействия влаги. Однако существенным недостатком этой технологии является то, что при испытаниях покрытия в летний период обнаружено, что коэффициент сцепления на поверхности, обработанной «Verglimit», уменьшается. Добавление Verglimit не требует существенного изменения технологии приготовления битумной смеси. К достоинствам следует также отнести то, что концентрация ионов хлора в дождевом стоке не превышает опасный для придорожной биоты уровень. Однако снижается износостойкость дорожного полотна и его трещиностойкость, т.е. ремонт дорожного покрытия приходится производить чаще [17].

В Японии на основе этой же технологии разработан ПГМ "Mafilon" (MFL). Экспериментальные исследования, проведённые в Китае, позволили выяснить, что добавление MFL ухудшает такие свойства асфальтовых смесей, как прочность и водостойкость, поэтому были предложены различные его модификации. В частности, асфальтобетонная смесь HESAM [18], в которой MFL замещает часть минерального наполнителя, содержит также частицы каучука (RP), а асфальт SMA13 (Stone Matrix Asphalt) - полиэфирные волокна. Антигололёд-

ный эффект подобных покрытий действует в течение 6-7 лет [19].

В России производят аналогичную антиобледенительную добавку к асфальтобетонным смесям - «Грикол» (тонкодисперсный порошок из измельченных хлористых солей (90%) и гидрофобизатора на основе кремнийорганических продуктов (10%)) [2]. Введение добавки при приготовлении асфальтобетона позволяет обеспечить антиобледенительный эффект при колебаниях температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-6^{\circ}\text{C}$ . При более низких температурах воздуха необходимо производить дополнительную обработку ПГМ, однако удельный расход и количество циклов обработки уменьшается, что снижает как затраты на содержание дорог, так и интенсивность проявления негативных последствий.

Не содержащий хлоридов кремнийорганический модификатор МПА-130 разработан в Уральском государственном лесотехническом университете (УГЛТУ). Этим веществом обрабатывают неуплотнённую асфальтобетонную смесь, предупреждая образование центров кристаллизации льда на поверхности дорожного покрытия. Проведённые на опытной площадке испытания показали, что при температурах, близких к  $0^{\circ}\text{C}$ , на покрытии, обработанном модификатором, снежного наката не образуется и можно проводить снегоочистку без применения ПГР, в то время как на обычном покрытии скользкий накат начинает образовываться практически сразу после начала снегопада. При экспериментальном разливе воды асфальтобетонное покрытие, обработанное реагентом МПА-13, по прошествии 12 ч при  $-10^{\circ}\text{C}$  образовавшийся лед также легко снимался с поверхности механическим способом [20].

Следует подчеркнуть, что применение антиобледенительных добавок для дорожных одежд не должно ухудшать свойств безопасности в другие периоды года и долговечности покрытия. Основным препятствием для применения антиобледенительных добавок при строительстве дорог является тот факт, что при этом значительно повышается стоимость асфальтобетонного покрытия. Однако, рассматривая полный жизненный цикл автодороги, следует учесть, что применение подобных добавок не только удешевляет, но и повышает энерго- и экологическую эффективность содержания дороги в зимний период.

Среди других методов модифицирования дорожного покрытия на мостах и эстакадах можно упомянуть использование покрытий на основе вулканизированных неполярных каучуков, таких, например, как «Полимаст» на основе полиметилметакрилата (ПММА) [21]. К их достоинствам следует отнести то, что за счёт их малой массы надёжность конструкций сохраняется при сокращении расхода стального проката на 7-10 %, а также повышается износостойкость конструкций.

Ещё одним способом борьбы с наледью является подогрев дорожного полотна с помощью различных источников тепловой энергии и различных теплоносителей. Подогрев может осуществляться как снаружи с помощью специальной техники, так и изнутри, когда теплоносители заложены под поверхностью дороги при её возведении. Этот способ борьбы с гололёдом используется на участках, требующих особого внимания к безопасному состоянию покрытия, таких как эстакадные и мостовые конструкции, пешеходные переходы, резкие повороты дороги.

В настоящее время можно привести некоторые примеры использования подогрева на автодорогах [22]. Так, например, в Японии создана система обогрева автодорог с помощью труб с горячей водой, проложенных под поверхностью дороги, при этом используются добавки в асфальт, улучшающие его теплопроводность. В летнее время происходит накопление тепла (на 30 метровой глубине) от разогрева солнцем поверхности, зимой с помощью электронасоса теплая вода поднимается к поверхности. Этот способ также предотвращает деформацию покрытия из-за высоких температур. Однако, поднимаясь к поверхности, вода быстро остывает. Для обогрева труб, наполненных водой, также используется геотермальная энергия. Аналогичные системы существуют в США.

В США и Канаде используются системы электрообогрева на основе различных волокон, проложенных под поверхностью дороги, например, углеволоконистые ленты, обмотанные вокруг армирующей сетки. Однако, в связи с неравномерностью распределения тепла по поверхности, это может привести к нарушению целостности покрытия дороги. Применяются также термопроводящие композитные материалы в составе цемента (углеродные нанотрубки) и другие добавки, улучшающие тепло и электропроводность (Канада). В качестве добавок в асфальтобетонные смеси используется графит, углеродные и наноуглеродные волокна, алюминиевая стружка, частицы стали. Преимуществом углеводородных волокон является то, что они не подвержены коррозии. Однако данный способ, очевидно, является в настоящее время дорогостоящим, кроме того, замена добавок, которые обычно используются для асфальтобетонных и цементобетонных смесей другими, требует изменений в технологии подготовки и укладки покрытия.

Основной причиной ограниченности физических методов борьбы с гололёдом, т.е. применения разных способов обогрева, являются существенные затраты на их реализацию. С точки зрения экологической безопасности имеет значение также дополнительное потребление электроэнергии, при условии её производства на тепловых электростанциях, особенно, работающих на угле или тяжёлых нефтепродуктах. Однако с переходом электроэнергетики на возобновляемые источники энергии и развитием методов подогрева дорожного полотна, возможно, физические методы будут применяться шире.

Таким образом, следует отметить, что содержание дорог в холодное время года в состоянии, обеспечивающем безопасность движения, подразумевает как меры, предпринимаемые при создании автодорог (особые виды покрытия, системы нагревания и т.д.), так и меры, предпринимаемые непосредственно в процессе эксплуатации и обслуживания уже существующих дорог. Несмотря на тот факт, что критерий безопасности передвижений, безусловно, является наиболее важным, экологические последствия также должны учитываться при разработке схемы предотвращения скользкости на дороге, в том числе и при выборе ПГМ [23].

Поскольку погодные условия, учитывая общие тенденции изменения климата, значительно различаются по годам и не подлежат усреднению, контроль оптимального расходования ПГМ с учётом конкретных погодных-метеорологических условий и различных категорий дорог является одним из важнейших факторов обеспечения безопасности, в том числе и экологической при содержании дорог. Необходима разработка

соответствующих методик для применения не только в различных климатических зонах Российской Федерации, но и при различных погодных условиях с учётом опыта таких стран как Финляндия, Швеция и др.

В некоторых странах, например в США, используется комплексная программа борьбы с гололёдом, основанная на предварительной антигололедной обработке покрытий автомобильных дорог. Однако такой метод требует наличия системы прогнозирования погодных и температурных условий на определенных участках дороги и своевременной передачи информации о погодных условиях на дороге соответствующим службам, а также использования более сложного распределительного и снегоочистительного оборудования. Этот опыт также требует изучения, учитывая большую протяжённость Российской Федерации с севера на юг и схожесть природных условий с северными областями США.

Учитывая многообразие способов борьбы с гололёдом, необходим системный подход, основанный на рассмотрении всего жизненного цикла дороги с учётом климатических условий и особенностей экономики региона. Следует использовать возможности более гибкого планирования обслуживания дорог в зимнее время, учитывая краткосрочные детальные прогнозы погодных условий. Это в свою очередь предусматривает создание информационных систем, передающих данные, полученные метеорологами, руководителям служб, отвечающих за содержание дорог в надлежащем виде. Такой комплексный подход способен повысить эффективность обслуживания автодорог, и, в том числе, снизить расход ПГМ, тем самым повысив уровень экологической безопасности без ущерба для безопасности передвижений.

## Литература

1. Статистика ДТП в России за 2019 год: причины ДТП, статический фактор/ электронный ресурс, url: <https://auto.rambler.ru/roadaccidents/42607002-statistika-dtp-v-rossii-za-2019-god-prichiny-dtp-staticheskiy-faktor> (дата обращения 22.01.2020).
2. Методические рекомендации по применению наполнителя "Грикол" в составах асфальтобетонных смесей для устройства покрытия с антигололедными свойствами, утверждённые распоряжением Росавтодора № ОС-564-р от 27.06.2002 г.
3. Преимущество многокомпонентных антигололедных реагентов / сайт прогпс24.рф, url: [https://прогпс24.рф/site\\_th/news/mnogokomponentnye-antigololednye-reagenty-i-ikh-preimushchestva](https://прогпс24.рф/site_th/news/mnogokomponentnye-antigololednye-reagenty-i-ikh-preimushchestva) (дата обращения 30.01.2020).
4. Противогололедные материалы и антигололедные реагенты/ электронный ресурс url: <http://www.tehstroy.ru/produkt.php>, (дата обращения 6.02.2020).
5. Требования к противогололедным материалам. ОДН 218.2.027-2003 (утв. распоряжением Минтранса РФ от 16.06.2003 N ОС-548-р).
6. Best Management Practices for Road Salt in Winter Maintenance/ портал clearroads.org /wp-content/uploads/dlm\_uploads/0537\_2015-Clear-Roads-Best-Practice-Guide-WEB.pdf, дата обращения 16.01.2020.
7. Королев В.А., Горняков А.К. Оценка влияния противогололедных реагентов на городские территории при инженерно-экологических изысканиях/ Журнал «Инженерные изыскания», том XII, № 1-2/2018, с. 66-79.

8. Методические рекомендации по применению экологически чистых антигололедных материалов и технологий при содержании мостовых сооружений, ОДМ 218.5.006-2008, утверждены распоряжением Росавтодора от 10.09.2008 № 383-р.
9. Кустарев Г.В. Антигололедные реагенты против коррозии/ Журнал «Автомобильные дороги» № 1(1010), Январь, 2016.- с. 54-55.
10. Чудакова С.Б. Токсико-гигиеническая оценка степени опасности антигололедных реагентов /электронный ресурс url: <http://medical-diss.com/medicina/toksikologo-gigienicheskaya-otsenka-stepeni-opasnosti-antigolodnyh-reagentov> (дата обращения 27.01.2020).
11. url: <http://www.cryotech.com/cryotech-cma-commercial>, (дата обращения 7.03.2020).
12. Антигололедные реагенты - вопросы и ответы, нормы и характеристики/ электронный ресурс, url: [www.iodine.ru/useful\\_information/1047/](http://www.iodine.ru/useful_information/1047/) (дата обращения 30.01.2020).
13. Megan Ray Nichols, What are some alternatives to rock salt?/электронный ресурс, url: [www.roadsbridges.com/rock-salt-alternatives-are-better-infrastructure-and-environment](http://www.roadsbridges.com/rock-salt-alternatives-are-better-infrastructure-and-environment) (дата обращения 21.01.2020).
14. Фрикционные противогололедные материалы: какие из них предпочтительней использовать/ сайт прогресс24.рф, url: [https://progress24.ru/site\\_th/news/friktsionnye-protivogolodnye-materialy-kakie-iz-nikh-predpochtitelney-ispolzovat](https://progress24.ru/site_th/news/friktsionnye-protivogolodnye-materialy-kakie-iz-nikh-predpochtitelney-ispolzovat) (дата обращения 29.01.2020).
15. Ю.Н. Розов, Экологически безопасные противогололедные материалы и технологии/ электронный ресурс, url: <http://www.rador.ru/activities/totals/2006/material071206/09.pdf> (дата обращения 06.02.2020).
16. Транспорт и здоровье //SUTP [Электронный ресурс], url: [http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A\\_Sourcebook/SB5\\_Environment%20and%20Health/GIZ\\_SUTP\\_SB5g\\_Urban-Transport-and-health\\_RU.pdf](http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A_Sourcebook/SB5_Environment%20and%20Health/GIZ_SUTP_SB5g_Urban-Transport-and-health_RU.pdf) (дата обращения 23.01.2020).
17. Evaluathion of Verglimit (A De-icing Additive in Plant Mixed Bituminous Surface)/электронный ресурс, Url: <http://dotapp7.dot.state.mn.us/research/pdf/198902.pdf> (дата обращения 10.03.2020).
18. Ke Zhong, Mingzhi Sun, Ronghua Chang, Performance evaluation of high-elastic/salt-storage asphalt mixture modified with Mafilon and rubber particles/Construction and Building Materials Volume 193, 30 December 2018, Pages 153-161.
19. Jian Zhou, Jing Li, Guoqiang Liu, Tao Yang, and Yongli Zhao, Long-Term Performance and Deicing Effect of Sustained-Release Snow Melting Asphalt Mixture / Advances in Civil Engineering, Volume 2019, Article ID 1940692, url: <https://doi.org/10.1155/2019/1940692> (дата обращения 2.02.2020).
20. Кудрявцев, А.В. Гидрофобизация дорожного покрытия для борьбы с гололедом Текст. / А.В. Кудрявцев, С.И. Булдаков // Научное издание. Материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов УГЛТУ / УГЛТУ. Екатеринбург, 2004. – С. 98-101.
21. Сайт компании «Поликров»/ url: <http://polikrov.ru/bridges/tonkosloynoe-pokryitie-gidroizolyatsiya-i-dorozhnaya-odezhda/primenenie-tonkosloynih-polimernyh-pokryitij-na-mostah-putevrovodah/index.html>, дата обращения 16.03.2020.
22. ZhaoHui Yang Joey, Intersection-pavement de-icing: comprehensive review and the state of the practice / Sciences in Cold and Arid Regions » 2019, Vol. 11 » Issue (1): 1-12.doi: 10.3724/SP.J.1226.2019.00001 (дата обращения 11.02.2020).
23. Белый О.В. Фундаментальные основы построения единой транспортной системы страны. – СПб,: Наука, 2017.-127 с.

#### Сведения об авторах:

**Белый Олег Викторович**, директор по науке  
СПбНЦ РАН,  
телефон: 323-64-20,  
e-mail: [belyi@spbrc.nw.ru](mailto:belyi@spbrc.nw.ru).

**Барина Людмила Дмитриевна**, зав. сектора  
междисциплинарных проблем транспортных систем  
СПбНЦ РАН,  
телефон: 323-64-20,  
e-mail: [barinova@spbrc.nw.ru](mailto:barinova@spbrc.nw.ru).

**Забалканская Любовь Эдуардовна**, ведущий научный  
сотрудник сектора междисциплинарных проблем  
транспортных систем СПбНЦ РАН,  
телефон: 323-64-20,  
e-mail: [ecoipt@yandex.ru](mailto:ecoipt@yandex.ru).

Адрес: 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская  
набережная дом 5



**ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ХОЛОДНОЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ  
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ  
НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА**

Кандидат техн. наук, доцент **Лазарева Т.Л.**,  
кандидат техн. наук, профессор **Ярмолинская Н.И.**  
(Тихоокеанский государственный университет)

**OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF COLD ASPHALT-CONCRETE MIXTURE  
IN ORDER TO INCREASE THE EFFICIENCY OF REPAIR WORKS ON THE ROADS  
IN THE SOUTH OF THE FAR EAST**

**T.L. Lazareva**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
**N.I. Yarmolinskaya**, Ph.D. (Tech.), Professor  
(Pacific National University)

*Холодный асфальтобетон, адгезионные добавки, оперативный ремонт дорожных покрытий, полимерно-битумное вяжущее, термоэластопласты, температура хрупкости, ремонтные работы, автомобильные дороги.*

*Cold asphalt concrete, adhesion additives, quick repair of road surfaces, polymer-bitumen binder, thermoplastic elastomers, freezing temperature, repair work, highways.*

*Приводится обзор исследований, в результате которых разработана рецептура и технология модифицированной холодной складированной асфальтобетонной смеси для оперативного ремонта дорожных покрытий. Для приготовления смеси используется жидкое полимерно-битумное вяжущее на основе термоэластопласта отечественного производства. Для повышения коррозионной прочности предложено использование адгезионной добавки амфолитного типа. Применение холодной асфальтобетонной смеси при проведении ремонтных работ в осенне-весенние периоды года на начальной стадии разрушения дорожного асфальтобетонного покрытия в условиях отрицательных температур окружающего воздуха существенно снижает затраты.*

*The article provides an overview of studies, as a result of which the formulation and technology of the modified cold stored asphalt mix for the operational repair of pavements was developed. To prepare the mixture, a liquid polymer-bitumen binder based on domestic thermoplastic elastomer is used. To increase the corrosion resistance, the use of an ampholytic type adhesive additive is proposed. The use of cold asphalt concrete mix during repair work in the autumn and spring periods of the year at the initial stage of the destruction of asphalt concrete pavement in conditions of negative ambient temperatures significantly reduces costs.*

Дальний Восток – это территориальное образование Российской Федерации, одно из самых крупных по площади – 6215,9 тыс. кв. км, что составляет 36,4 % территории России. Основную часть существующей дорожной сети составляют дороги III и IV категорий. Большая часть дорог по своим транспортно-эксплуатационным характеристикам не соответствует возрастающим требованиям транспортных потоков, поэтому строительство новых и ремонт существующих дорог – основная составляющая в развитии экономики региона.

Значительная часть дефектов, приводящих к снижению уровня состояния автомобильных дорог, напрямую связаны с несоблюдением технологии устройства дорожных покрытий и качеством применяемых материалов. Кроме того, немаловажную роль играют погодные-климатические условия региона. Дальневосточный регион характеризуется большой контрастностью температур в течение года. Преобладающее взаимодействие воздушных масс материковой и морской частей региона приводит к высоким сезонным перепадам температур. Например, для входящего в состав ДФО Хабаровского края средняя температура воздуха летом составляет 22,5° С, зимой – минус 19,8° С. Амплитуда колебаний

температуры между абсолютным максимумом +35° С (июль) и минимумом – 40° С (январь) достигает 75° С. Средняя продолжительность безморозного периода составляет 152 дня.

Отмечена существенная особенность климата Дальнего Востока России в его южной части – радиационный режим. Весной, в начальный период оттаивания, особую опасность представляет повышенный уровень солнечной радиации, когда различные значения альbedo покрытия и обочин приводят к интенсивному таянию снежно-ледяных образований на дорожном покрытии в дневное время, что увлажняет проезжую часть. Талые воды, замерзая в ночное время в трещинах покрытий, приводят к их быстрому разрушению. Температурные колебания относительно 0° С в этих районах значительно больше, чем на территории европейской части России.

Избыточное увлажнение территории региона обусловлено муссонным характером климата. На всей территории Дальнего Востока летом идут муссонные дожди, нередко проносятся разрушительные тайфуны. Если сравнивать с II дорожно-климатической зоной европейской части России, то окажется, что количество осадков здесь больше в 1,2–1,8 раза [1].

Таким образом, суровые климатические условия юга Дальнего Востока определяют значительные разрушения дорожных покрытий, которые обнаруживаются уже в начале-середине марта. Поскольку работа с горячими асфальтобетонными смесями в этот период затруднена, вызывает большой интерес использование холодных асфальтобетонных смесей, заблаговременно (в летне-осенний период) заготовленных для проведения ремонтных работ.

Холодный асфальтобетон – это разновидность асфальтобетона, который приготавливается в горячем состоянии. Однако его укладка производится в холодном виде. Температура окружающей среды при этом должна быть не ниже +5° С. В Советском Союзе холодные асфальтобетонные смеси начали применять в 50-х гг. прошлого века [2]. Для холодных асфальтобетонных смесей использовались средне густеющие битумы марки СГ 70/130 или медленно густеющие битумы марки МГ 70/130 по ГОСТ 1195582.

Покрытие формировалось при укладке холодной смеси с последующим уплотнением движущимися транспортными средствами. Ослабленная коагуляционная структура данного вида покрытия приводила к недостаточной прочности и долговечности материала. Попытки использовать летучие растворители в качестве разжижителя битума с целью ускорения твердения, а также использование в качестве вяжущего водных эмульсий битума значимых результатов не дали, поэтому в 1970-х годах от идеи использования холодного асфальтобетона отказались.

Новая волна интереса к данному материалу возникла в начале 2000-х гг., с появлением на рынке добавок – полимерных модификаторов битумного вяжущего и поверхностно-активных веществ [3-6].

На базе центра испытаний строительных материалов Тихоокеанского государственного университета были проведены экспериментальные исследования по оптимизации состава холодной асфальтобетонной смеси. При этом использовались местные строительные материалы и модифицированные жидкие битумные вяжущие.

Состав минеральной части холодного асфальтобетона типа Бх: щебеночно-песчаная смесь – 50 %; песок природный – 42 %; минеральный порошок – 8 %. В целях получения жидкого битума вязкий дорожный битум БНД 90/130 был разжижен дизельным топливом. Расход дизельного топлива варьировался от 14 до 16% от массы вязкого битума. По качественным показателям свойств полученные образцы жидкого битума с условной вязкостью от 70 до 86 с отвечали требованиям марки СГ 70/130 по ГОСТ 11955.

В экспериментальных исследованиях определялся оптимальный расход органического вяжущего в составе холодной асфальтобетонной смеси. С этой целью было определено влияние содержания жидкого битума (в пределах от 4,8 до 6,0%) на физико-механические показатели образцов асфальтобетона. Визуальные наблюдения показали, что при содержании органического вяжущего 4,8% смесь была сухой и жесткой. При содержании органического вяжущего 5,4%, смесь по внешнему виду была блестящей и однородной, имела хорошую подвижность, при этом вяжущее полностью покрывало частицы минерального заполнителя. Образцы, приготовленные из этой смеси, характеризовались наиболее высокими прочностными показателями при минимальном водонасыщении.

В табл. 1. представлены результаты испытания образцов холодного асфальтобетона. Использовалось вяжущее СГ 70/130, разжижитель битума – дизельное топливо.

Таблица 1

**Физико-механические свойства холодного асфальтобетона типа Бх**

Показатели	Вязкость вяжущего			Требования ГОСТ 9128, марка П тип Бх
	86 с	75 с	70 с	
1. Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2216	2295	2237	не регламентируется
2. Водонасыщение, %	5,01	5,93	6,52	5,0-9,0
3. Коэффициент водостойкости	0,86	0,89	0,87	не регламентируется
4. Сцепление при сдвиге, МПа	0,16	0,18	0,13	не регламентируется
5. Слеживаемость, число ударов	7	6	7	не более 10
6. Набухание, %	0,68	0,56	0,54	не регламентируется
7. Прочность при сжатии при температуре 20 °С, МПа				
<i>до прогрева</i>				
- сухих	0,79	0,83	0,81	не менее 1,0
- водонасыщенных	0,70	0,74	0,69	не менее 0,7
<i>после прогрева</i>				
- сухих	0,95	1,04	0,97	не менее 1,3
- водонасыщенных	0,94	1,12	0,93	не менее 1,0
7. Прочность на растяжение при расколе, МПа	0,30	0,33	0,25	не регламентируется

Анализ полученных результатов испытаний и сопоставление их с требованиями ГОСТ 9128 для асфальтобетона II марки типа Бх позволили сделать вывод: часть показателей свойств образцов холодного асфальтобетона не соответствуют требованиям стандарта, в частности, по прочностным показателям для сухих и водонасыщенных образцов. Для повышения свойств холодной асфальтобетонной смеси необходима корректировка ее состава.

Существующие способы повышения водостойкости асфальтобетона можно сгруппировать по:

- изменению молекулярно-поверхностных свойства битумов;
- одновременному воздействию на минеральный материал и молекулярно-поверхностные свойства битума [7, 8].

Для приготовления вяжущего СГ 70/130 использовался битум производства АО НК «Хабаровский НПЗ» марки БНД 90/130, полученный методом окисления и соответствующий требованиям ГОСТ 22245.

Тем не менее, некоторые качественные характеристики свойств вязких нефтяных битумов российского производства не соответствуют требованиям дорожного строительства в современных условиях повышенных нагрузок на ось автомобиля. Битум должен обладать свойствами эластомера, чтобы противостоять повышенным деформациям автомобильного колеса, хотя по своей природе является термопластом. Причем эти

свойства должны сохраняться для широкого диапазона температур эксплуатации дорожного покрытия автомобильной дороги. Во-вторых, для российских условий, особенно в Хабаровском крае с его зимними температурами в среднем минус 22-24° С и минимальными до минус 40° С, битумы недостаточно трещиностойки.

Решение проблемы возможно путем введения в состав вяжущего полимерных добавок. Это должен быть термоэластопласт, способный создать пространственную эластичную структурную сетку в объеме полимерно-битумного вяжущего (ПБВ). При этом эластичность вяжущего должна быть не менее 75 %, а ПБВ должно сохранять работоспособность в температурном интервале не менее 90° С [8].

Модификация дорожных битумов наилучшим образом осуществляется смесевыми термоэластопластами. Это смеси термопластов и эластомеров с большим модифицирующим потенциалом. Термоэластопласты, благодаря своему составу и структуре, обладают эластичностью и способны к обратимым деформациям после снятия нагрузки. В полимерно-битумном вяжущем содержание полимера может находиться в пределах от трех до семи процентов.

Получение модифицированного битумного вяжущего широко применяют блоксополимеры типа СБС на основе бутадиена и стирола. При выборе вида полимерного модификатора в исследованиях использовали полимеры Kraton D1185 (Швеция), SBS-LG 501 (Южная Корея) и модифицирующие добавки ДСТ-30Р-01 и ДСТ-30-01 отечественного производства. В составе вяжущего концентрация полимера варьировалась от 1 до 5%.

Проведенные исследования позволили установить влияние количества полимерной добавки на технические характеристики полимерно-битумного вяжущего на основе дорожного битума БНД 90/130. Построены графики, на которых явно проявляется S-образная форма кривых. При концентрации в битуме полимера типа СБС 2,5-3,0 % на кривых наблюдается перелом. Причиной является процесс структурирования модифицированного вяжущего с образованием пространственной полимерной сетки, которая придает ему специфические свойства. Особый интерес в этом плане представляют температурные характеристики модифицированного вяжущего (рис. 1).

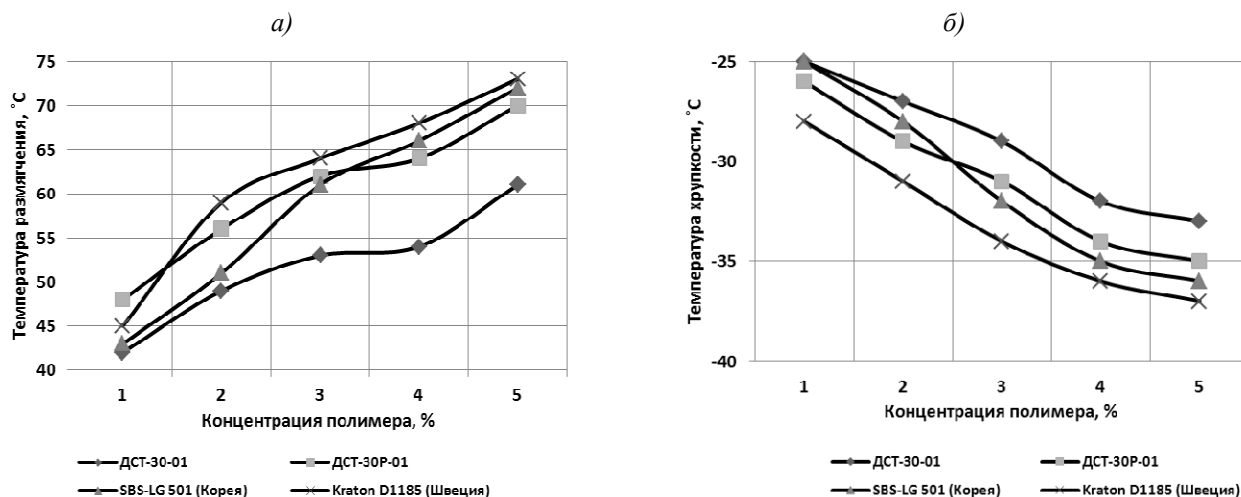


Рис. 1. Влияние вида и содержания полимерных добавок в составе вяжущего на температуру размягчения (а) и температуру хрупкости (б)

Теплостойкость вяжущего косвенно характеризуется показателем температуры его размягчения, которая соответствует переходу вяжущего из упруго-пластического реологического состояния в вязко-текучее, с разрушением когезионных связей. Введение 3,0% полимера приводит к возрастанию температуры размягчения от 43 до 53-64° С (рис. 1,а).

Важнейшим эксплуатационным показателем, характеризующим трещиностойкость вяжущего при отрицательных температурах и устойчивость дорожного покрытия к разрушению, является температура хрупкости по Фраасу. Именно этот показатель устанавливает нижнюю границу перехода из упруго-пластического реологического состояния в упруго-хрупкое и определяет температурный интервал работоспособности (ИР) вяжущего.

На территории Дальнего Востока минимальная температура воздуха может достигать минус 50° С, а максимальная – плюс 40° С. Следовательно, интервал работоспособности вяжущего должен быть не менее 90° С. Следует отметить, что ИР большинства битумов марки БНД не превышает 65° С.

Температура хрупкости вяжущего снижается при введении полимерных добавок на 12-15° С и более (рис. 1,б). Анализ результатов исследований, представленных на рис. 1,б, показывает, что введение термоэластопласта в состав вяжущего увеличивает интервал работоспособности ПБВ до значений 90-95° С. Воздействие различных типов добавок примерно одинаково.

Степень структурированности вяжущего зависит от количества модификатора (рис. 2). Введение полимерной добавки приводит к увеличению растяжимости ПБВ при 0° С. Причина – образование эластичной пространственной сетки полимера в объеме вяжущего. Даже при низких температурах сохраняется повышенная степень структурированности системы (рис. 2,а).

Следует отметить, что основная цель работы – изменение качества вяжущего, модификация битума, являющегося термопластом, в эластомер. Это становится возможным при изменении структуры вяжущего с приданием ему свойств обратимого деформирования. На рис. 2,б приведена зависимость эластичности вяжущего от вида и содержания полимерных добавок.

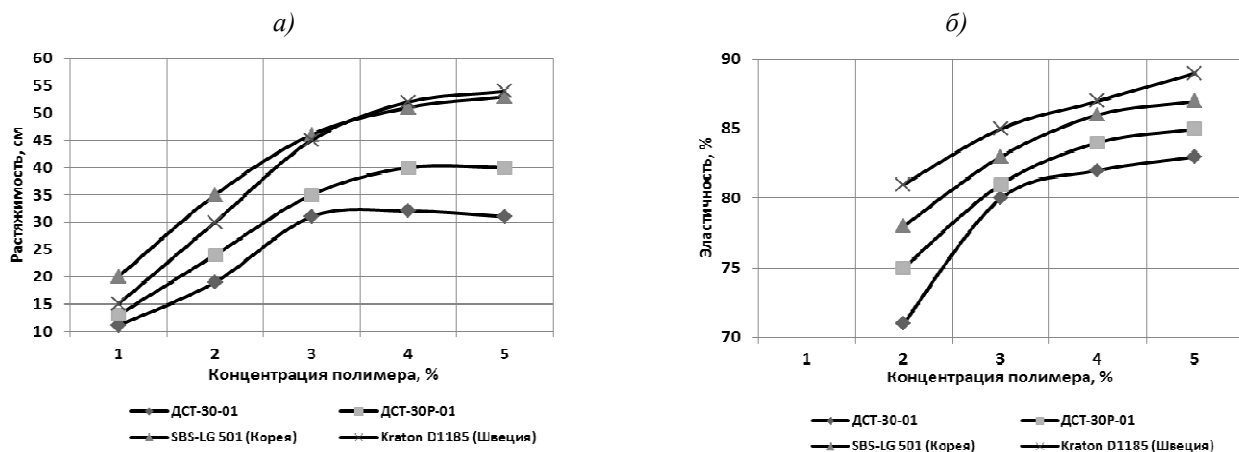


Рис. 2. Влияние вида и содержания полимерных добавок в составе ПБВ на растяжимость (а) и эластичность (б) вяжущего при температуре 0 °С

Исследование эластических свойств вяжущего показывает, что эластичность ПБВ достигает критического значения (более 75% при 0° С) при содержании добавки полимера 3,0-3,5% и далее меняется незначительно. Образование пространственной сетки полимера при этой концентрации оптимально. Это свидетельствует о проявлении в вяжущем эластических свойств даже при пониженных температурах.

Обобщая результаты исследований, можно сделать вывод, что оптимальное содержание полимера в ПБВ составляет 2,5-3,0% по массе. Следует признать наиболее эффективными добавками термоэластопласты Крапон Д1185 (Швеция) и DST 30P-01(Россия).

Дальнейшие исследования показали, что на адгезию вяжущего к каменным материалам введение полимеров значительного влияния не оказывает. Дисперсная среда в рассматриваемой системе – битум. Полимер в данном случае является фазой. Адгезионное сцепление между вяжущим и поверхностью каменного материала обуславливается адсорбцией полимером смолообразной части углеводов битума. В результате клеящая способность вяжущего снижается.

Для повышения прочности сцепления между полимерно-битумным вяжущим и минеральными заполнителями кислого характера рекомендуется использовать добавки в битум поверхностно-активных веществ (ПАВ) катионного типа [9-11]. Исследования, проведенные в Центре испытания строительных материалов ТОГУ, показали, что ряд адгезионных добавок отечественного производства, таких как Амдор, БП-3М, ДАД-1 весьма эффективны в этом отношении. Оптимальный расход добавок 0,5-0,7% к массе битума. При этом основные показатели битума существенно не изменяются, в то время как адгезионное сцеплений взаимодействующих систем возрастает до 93-95% (определение по методу Колбановской) [12].

Целью дальнейших исследований было определение влияния на показатели свойств битума совместного введения полимерных и адгезионных добавок. Показатели свойств модифицированного битума приведены в табл. 2.

Исследования показали, что адгезионные свойства битума с добавкой ПАВ повышаются при увеличении концентрации эластопласта DST-30P-01 в битуме. В целом совместное использование полимера и адгезионной добавки приводит к суммированию индивидуальных эффектов от каждой добавки, что должно способствовать существенному росту коррозионной стойкости асфальтобетона.

Таблица 2

### Влияние совместного введения полимерной и адгезионной добавок на свойства битума БНД 90/130

Содержание полимера DST-30P-01 в битуме, %	Содержание добавки ДАД-1 в битуме, %	Температура размягчения битума, °С	Пенетрация битума, °П (при 25 °С)	Температура хрупкости битума, °С	Адгезия по методу Колбановской, %
0	0,7	43,5	123	-19	92
3	0,7	53	128	-30	94
6	0,7	60	133	-33	98

В дальнейших исследованиях в качестве полимерной добавки в соответствии с ГОСТ Р 52056 был использован полимер класса термоэластопластов типа СБС DST 30P-01. В качестве адгезионной добавки использовали добавку амфолитного типа ДАД-1 (СТО 22320188).

Таблица 3

### Физико-механические свойства холодного асфальтобетона типа Бх

Показатели	Вязкость модифицированного вяжущего			Требования ГОСТ 9128, I марка тип Бх
	86 с	75 с	70 с	
1. Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2288	2314	2267	не регламентирована
2. Водонасыщение, %	5,31	5,10	5,86	5,0-9,0
3. Сцепление при сдвиге, МПа	0,36	0,41	0,38	не регламентировано
4. Коэффициент водостойкости	0,85	0,87	0,94	не регламентирован
5. Слеживаемость, число ударов	7	8	8	не более 10
6. Прочность при сжатии при температуре 20 °С, МПа				
до прогрева				
- сухих	1,86	1,96	1,94	не менее 1,5
- водонасыщенных	1,56	1,69	1,81	не менее 1,1
после прогрева				
- сухих	1,96	2,28	2,00	не менее 1,8
- водонасыщенных	1,75	1,94	1,92	не менее 1,6
7. Прочность на растяжение при расколе, МПа	0,59	0,63	0,36	не регламентирована

В табл. 3 представлены результаты испытаний образцов холодного асфальтобетона типа Бх. Он был приготовлен на полимерно-битумном вяжущем марки ПБВ 40. Полученные показатели образцов асфальтобетона I марки типа Бх удовлетворяют требованиям ГОСТ 9128. Смесь с вязкостью ПБВ 75 с имеет лучшие характеристики свойств.

Опытное производство холодной асфальтобетонной смеси осуществлялось на АБЗ МУП г. Хабаровска «Дорремстрой». Для приготовления жидкого полимерно-битумного вяжущего использовали специальную емкость с циркуляционным насосом, который обеспечивал равномерное распределение разжижителя, полимерной и адгезионной добавок в расплаве битума.

Для условий Хабаровского края можно рекомендовать холодную асфальтобетонную смесь, приготовленную на полимерно-битумном вяжущем с адгезионной добавкой, для проведения ремонтных работ (заделки выбоин) асфальтобетонных покрытий.

В производственных условиях приготовление холодной асфальтобетонной смеси, модифицированной полимерными и адгезионными добавками, производилось в соответствии с «Руководством по строительству дорожных асфальтобетонных покрытий», СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги» и «Руководством по применению поверхностно-активных веществ при устройстве асфальтобетонных покрытий» (взамен ВСН 59-68).

При этом температурные параметры технологического процесса соответствовали значениям:

- нагрев минеральных материалов до 120-130°С;
- нагрев вяжущего с ПАВ – до 90-100°С;
- температура смеси на выходе – 90-110°С.

При приготовлении асфальтобетонной смеси инертные материалы перед подачей в сушильный барабан на транспортной ленте активировали известковым раствором состава 1:20.

Готовая асфальтобетонная смесь складировалась на отдельной площадке. Чтобы предотвратить слеживание смеси в штабеле, смесь некоторое время охлаждалась на воздухе при перемешивании фронтальным погрузчиком, а затем расфасовывалась в мешки с полиэтиленовыми вкладышами и хранилась на складе.

С помощью данной смеси был осуществлен ремонт ряда выбоин на ул. Ульяновской Индустриального района г. Хабаровска в конце октября 2015 г., при температуре воздуха минус 7°С. Приготовленная пакетированная холодная асфальтобетонная смесь доставлялась к месту укладки автотранспортом.

План производства работ предусматривал следующие технологические операции:

- вырезка (выпиливание) покрытия по контуру на глубину повреждения;
- очистка подготовленной карты сжатым воздухом от пыли и грязи;
- подгрунтовка основания карты жидким битумом;
- распределение смеси по поверхности выбоины;
- уплотнение холодной ремонтной смеси виброплитой 6-8 раз по одному следу с последующим припудриванием минеральным порошком;
- повторное уплотнение.

Обследование асфальтобетонного покрытия было осуществлено спустя шесть месяцев после его ремонта. Наличие дефектов не обнаружено. Эксплуатационное

состояние покрытия хорошее. Отсутствовало разрушение кромок, выкрашивания верхнего слоя не наблюдалось. Холодная асфальтобетонная смесь хранилась шесть месяцев в неотапливаемом складе. Технологические свойства смеси не изменились и она была пригодна к использованию.

Управлением дорог и внешнего благоустройства было заготовлено около 500 т холодной асфальтобетонной смеси производства асфальтобетонного завода МУП «Дорремстрой». Впервые его укладку начали при температуре минус 15°С в начале марта 2016 г. Аварийно-восстановительные работы с использованием холодного асфальтобетона велись на одной из главных транспортных магистралей города – проспекте Октября, на центральных улицах города, а также везде, где была необходимость неотложного ремонта.

«Мы понимаем, что это не панацея, а способ остановить процесс разрушения дороги до того момента, когда можно будет применять обычные технологии, – отметили в Управлении дорог и внешнего благоустройства – Ремонт по этой технологии идет довольно быстро. Для этого не требуется перекрывать движение. Нужен только собственно материал и трамбуемый инструмент» [13].

В последующие 2017-2019 гг. ремонтные работы с использованием холодного асфальтобетона производились не только ранней весной, но и поздней осенью, например, при восстановлении дорожных покрытий после аварийных земляных работ на теплотрассах. Имеется опыт использования холодного асфальтобетона даже при температуре минус 26°С. Использование инновационной технологии ремонта городских дорог позволило практически вдвое сократить объем бюджетных расходов на эти цели.

Таким образом, в результате исследований, проведенных Центром испытаний строительных материалов ТОГУ, разработана рецептура и технология модифицированной холодной складированной асфальтобетонной смеси для оперативного ремонта дорожных покрытий.

Проведение ремонтных работ в весенне-осенние периоды года с применением данной технологии возможно при отрицательных температурах окружающего воздуха. Это позволяет ремонтировать асфальтобетонные покрытия на начальной стадии разрушения и при небольших площадях, что уменьшит объемы разрушений дорожных одежд, повысит безопасность дорожного движения и снизит затраты на проведение ремонтных работ.

Данная технология не зависит от погодных условий, что позволяет ей занять достойное место в ряду способов ремонта дорожных покрытий в сложных климатических условиях юга Дальнего Востока.

## Литература

1. Природно-климатические условия территорий Хабаровского края и Еврейской автономной области : сайт. – URL : <http://feniigim.narod.ru/klimat.htm> (дата обращения 26.12.2019). – Текст : электронный.
2. Козлов, Г.Н. Холодный асфальтобетон. Теория, практика, перспективы применения / Г.Н. Козлов, В.А. Веренько, В.С. Чернега – Текст : электронный // «Федеральный строительный рынок» – 2006 – № 53. – URL: <http://fsr-stroy.ru/archive/6695> (дата обращения 26.12.2019).

3. Гридчин, А.М. Инновации дорожных материалов – холодный асфальтобетон / А.М. Гридчин, М.А. Высоцкая, Е.В. Чевтаева [и др.]. – Текст : непосредственный // Эффективные строительные композиты : материалы научно-практической конференции к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН Баженова Ю. М. – Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 132-137.
4. Емельянычева, Е. А. Способы улучшения адгезионных свойств дорожных битумов к минеральным материалам / Е. А. Емельянычева, А. И. Абдуллин. – Текст : непосредственный – Текст : непосредственный // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 3. – С. 198-204.
5. Высоцкая, М.А. Холодные технологии дорожно-ремонтных работ / М.А. Высоцкая, Е.В. Чевтаева – Текст : непосредственный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 6. – С. 30-34.
6. Руденский А.В. Холодный асфальтобетон. Возможности продления сезона строительных и ремонтных работ – Текст : непосредственный // Новости в дорожном деле: «Научно-технический информационный сборник «Информавтодор». – 2006. – Вып. 1. – С. 11-42.
7. Котлярский А. В. Долговечность дорожных асфальтобетонных покрытий и факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации / Э. В. Котлярский, О. А. Воейко. – М. : Техполиграфцентр, 2007. – 136 с. – Текст : непосредственный.
8. Leonid M. Gokhman. Theoretical principles of the bitumen structure and the role of asphaltenes (based on reologicalmetode): Chapter 8 in book «Asphalteus and Asphalts 2». Development in Petroleum Science, 40B. – Elsevier, Amsterdam, Lausanne, New-York-Oxford-Shannon-Singapore-Tokyo Edited by The Fu Yen and George Y. Chilingarian, 2000.
9. Золотарёв, В.А. Адаптация полимера типа СБС и поверхностно-активных веществ к окисленным и остаточным битумам / В.А. Золотарёв, Я.И. Пыриг, А.В. Галкин, С.В. Кудрявцева-Вальдес. – Текст : непосредственный // Наука и техника в дорожном строительстве – 2012. – № 3.– С. 21-23.
10. Горелышева, Л. А. Влияние адгезионных добавок на свойства асфальтобетона / Л. А. Горелышева – Текст : непосредственный // Автомобильные дороги. – 2007. – № 9. – С. 105–106.
11. Чернов, С.А. Комплексное модифицированное вяжущее для холодных асфальтобетонных смесей / С.А. Чернов, И.В. Мардиросова – Текст : электронный // Ростов: РГСУ. – 2010 – URL : <http://docplayer.ru/35934409-Udk-691-16-kompleksnoe-modificirovannoe-vyazhushchee-dlya-holodnyh-asfaltobetonnih-smesey.html> (дата обращения 26.12.2019).
12. Колбановская, А. С. Влияние природы битума и каменного материала на их сцепление / А. С. Колбановская, С. П. Шимулис – Текст : непосредственный // Тр. СоюздорНИИ. – 1977. – Вып. 11. – С. 47-54.
13. Мэр Хабаровска Александр Соколов оценил ход ремонта дороги с использованием холодного асфальта: Администрация г. Хабаровска: официальный сайт. – URL: [https://www.khabarovskadm.ru/news/index?type=special&ELEMENT\\_ID=710888](https://www.khabarovskadm.ru/news/index?type=special&ELEMENT_ID=710888) (дата обращения 28.12.2019) – Текст : электронный.

#### Сведения об авторах:

**Лазарева Татьяна Леонидовн**, доцент кафедры автомобильных дорог ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»,  
680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская 136.  
Телефон +7-914-191-56-58,  
e-mail: tl\_lazareva48@mail.ru.

**Ярмолинская Надежда Ивановна**, профессор кафедры автомобильных дорог ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»,  
680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская 136.  
Телефон +7-914-198-14-57,  
e-mail 00197@pnu.edu.ru.

**ОБОСНОВАНИЕ ЭТАПНОСТИ РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО УЧАСТКА  
АХАНГАРАН-ТУКИМАЧИ-СЫРДАРЬИНСКАЯ**

Кандидат техн. наук, доцент **Илесалиев Д.И.**  
(Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта,  
ТашИИТ, Республика Узбекистан),

аспирант **Сатторов С.Б.**  
(Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I (ПГУПС), г. Санкт-Петербург),

аспирант **Махматкулов Ш.Г.**  
(Чанъаньский университет, г. Сиань, Провинция Шэньси, Китай)

**SUBSTANTIATION OF THE PHASED DEVELOPMENT  
OF AHANGARAN-TUKIMACHI-SYRDARYA RAILWAY ROUTE**

**D.I. Ilesaliev**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor  
(Tashkent Institute of Railway Engineering (TIRE), Tashkent, Republic of Uzbekistan),

**S.B. Sattorov**, Postgraduate  
(Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), Saint Petersburg),

**Sh.G. Makhmatkulov**, Postgraduate  
(Chang'an University, ShaanXi Province, Xi'an, China)

*Железнодорожный транспорт, железнодорожный участок, провозная способность, грузовые перевозки, этапность развития.*

*Railway transport, railway sector, railway section, carrying capacity, freight transportation, stage in development.*

*Железнодорожная инфраструктура развивается дискретно на основе технических и технологических решений. Целью исследования является обоснование наиболее рационального варианта поэтапного развития железнодорожного участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская (Республика Узбекистан). Методология исследования основана на теории поэтапного развития железнодорожных сетей. Результаты исследования: варианты схем поэтапного развития участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская.*

*Railway infrastructure (in this article, it is considered as common ways, by railway stations and railway lines) - as a logistics facility, it increases discretely due to the use of technical and technological solutions. The purpose of the study is to justify the most rational way for the phased development of the railway section of Akhangaran-Tukimachi-Syrdarya. The research methodology is based on the theory of phased development of railway networks. Research results: options for phased development of the Akhangaran-Tukimachi-Syrdaryinskaya section were obtained.*

Планируемое железнодорожное направление Китай-Кыргызстан-Узбекистан – это кратчайший путь из Китая в страны Европы и Ближнего Востока. Однако ветхость основных фондов железных дорог этого направления значительно снижает их надежность и пропускную способность, особенно с учетом динамичного роста объемов грузоперевозок. Эта проблема связана не только с разработкой новых или совершенствованием существующих технических решений, но и с технологическими решениями, связанными с планированием, организацией и управлением транспортными потоками в перспективе.

Станция Тукимачи после реализации железнодорожного направления Китай-Кыргызстан-Узбекистан станет крупным железнодорожным узлом на пересечении транспортных направлений Север-Юг и Восток-Запад. Данная станция находится в черте мегаполиса и обслуживает стратегические объекты страны не имеет возможности дальнейшего развития станционных парков и путей.

В связи с этим, для решения задач по освоению перспективных объемов грузопотоков в данном исследовании предлагаются пути поэтапного развития участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская в следующей последовательности:

- определение текущей и перспективной провозной, а также пропускной способностей;
- прогнозирование перспективных объемов перевозок после запуска железнодорожного направления Китай-Кыргызстан-Узбекистан;
- определение возможных вариантов технического и технологического развития железнодорожного участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская;
- выбор рационального варианта для освоения грузопотока в будущем;
- разработка предложения альтернативной железнодорожной линии, которая бы полностью удовлетворяла потребности в перевозках с учётом их роста;
- экономическая оценка предложенных мероприятий.

**1. Степень разработанности.** В последние годы решениям проблем поэтапного развития железнодорожных линий были посвящены работы Ефименко Ю.И. [5-10], Батурина А.П. [4], Балжир Мунхдэлгэр [1-4], Пановой Ю.Н. [11-13], Сугоровского А.В. [15], Четчуева М.В. [16, 17] и др.

Большой вклад в вопросы поэтапного развития пропускной способности железнодорожных участков внес профессор А.П. Батурина [1-4]. В [1] разработаны и предложены перспективные варианты развития по техническому оснащению Монгольской железной дороги. Также в работе обоснованы перспективные технологии перевозок. Именно в этих целях автором поставлены и решены задачи, связанные с рациональным выбором технического оснащения железнодорожных линий [2]. Для этого автор в первую очередь проанализировал характеристику железной дороги и обосновал необходимость модернизации. Результаты исследований позволили определить оптимальную схему увеличения провозной способности. В исследовании [3] обобщены и выделены первоочередные задачи развития железной дороги. Среди них: строительство дополнительных раздельных пунктов; удлинение приемоотправочных путей с одновременным усилением тяги в целях увеличения весовых норм поездов; сооружение автоблокировки, а также строительство главного пути. Эта задача является последней стадией модернизации. По мнению источника [4] последовательность выбранных мероприятий практически совпадает на всех железнодорожных участках.

Большой вклад в вопросы поэтапного развития железнодорожных станций внесен ПГУПСом, под руководством Ю.И. Ефименко [5-10, 15-17]. В диссертации «Обоснование этапности развития железнодорожных станций и узлов» [5] рекомендовано использовать два критерия эффективности - оптимальности процесса развития станции и оптимального состояния. Первый из них применяется для выбора решений на отдельных шагах оптимизации, а второй - для выбора оптимального состояния в любой год расчетного периода. В источнике [6] обоснован метод последовательного развития пассажирских технических станций для обеспечения эффективности инвестиций путем постепенного наращивания путевого и технического развития. Метод исследования обоснован на использовании динамического программирования. В исследовании авторов [7] излагается принцип определения рациональности поэтапного развития горловин железнодорожных станций при устойчивом росте размеров движения, а материалы статьи [8] свидетельствуют о сложностях обоснования рациональности поэтапного развития железнодорожных станций в условиях рыночной экономики. Это связано с колебанием объемов перевозочной работы и фактором неопределенности исходной информации.

Авторами статьи [9] говорится о необходимости во всех случаях определения рациональности поэтапного развития объекта. Авторы отмечают наличие оптимального усиления развития железнодорожной станции, которая позволяет избежать неверных решений.

В статье [10] описан комплексный метод обоснования рациональности поэтапного развития логистического объекта и транспортных узлов с использованием динамического программирования. В нем также уделено отдельное внимание особенностям применения указанного метода при наличии альтернативных вариантов

проектных решений. На основании полученных авторами результатов можно говорить о необходимости проведения более глубокого анализа возможных проектных решений с использованием особого метода нумерации вариантов технического состояния железнодорожных станций, предварительно исключив нелогичные или заведомо нерациональные решения при наличии альтернативных вариантов.

Метод обоснования рациональности поэтапного развития тыловых контейнерных терминалов при устойчивом росте объемов работы разработан в диссертационной работе [11]. Здесь же проведена практическая проверка предлагаемого метода выбора рациональности поэтапного развития контейнерных терминалов с учетом стохастической природы транспортных потоков.

В источнике [12] под рациональным вариантом поэтапного развития понимается последовательность мероприятий по изменению технического состояния, которые в совокупности с рациональной технологией работы логистического объекта обеспечивают минимум критерия эффективности за расчетный период.

В исследовании [13] контейнерные терминалы определены как важнейшие звенья транспортных логистических цепей. На основе технико-экономических расчетов составлен график оптимальных переходов системы из одного состояния в другое в процессе развития. Исследование показало, что по очередное развитие терминала позволяет отдалить во времени часть инвестиций.

В диссертационной работе [14] разработан метод оптимизации поэтапного развития многопарковых пассажирских технических станций в условиях роста объемов работы. В работе также уделяется внимание этапам развития пассажирских технических станций и темпам роста объемов работы, учёту инфляции и рисков, нормативам инвестиционных вложений и эксплуатационных расходов.

В диссертации [17] разработан общий метод обоснования рациональности последовательного развития горловин железнодорожных станций для наращивания их путевого развития с минимальными затратами за расчетный период. В работе также решена задача выбора рационального варианта секционирования железнодорожных путей на примере горловин парков приёма и отправления сортировочных станций.

Согласно исследованию [18] анализ организации строительства при развитии парков в процессе эксплуатации станций указывает на целесообразность посекционного увеличения числа путей. Автор утверждает, что число путей в добавляемых секциях может быть от двух до четырёх в «головной» части парков и до пяти-восьми в «хвостовой». Предлагаемый принцип проектирования горловин позволяет существенно облегчить развитие железнодорожных станций в процессе эксплуатации и может быть положен в основу определения оптимального поэтапного усиления путевого развития станций.

Зарубежные авторы работ [19-25] при поиске рационального этапа развития железнодорожных участков в основном опираются на метод динамического программирования.

Анализ источников показал, что на сегодняшний день практическое применение предложенных способов по вопросу увеличения провозной способности не обеспечивают рационального варианта решения. В данных методиках не учтены все возможные мероприя-



тия по увеличению провозной способности железных дорог ввиду ограниченности рассматриваемых схем.

В настоящее время имеется необходимость развития методики по организации и развитию грузовых перевозок на сети, которая не потеряла своей актуальности и которую можно отнести к числу важных научных проблем.

## 2. Характеристика существующего железнодорожного участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская.

К основным характеристикам технического состояния железнодорожного участка, влияющим на величину пропускной способности, относятся: число главных путей станции, полезная длина приёма-отправочных путей и др. (см. рис. 1).

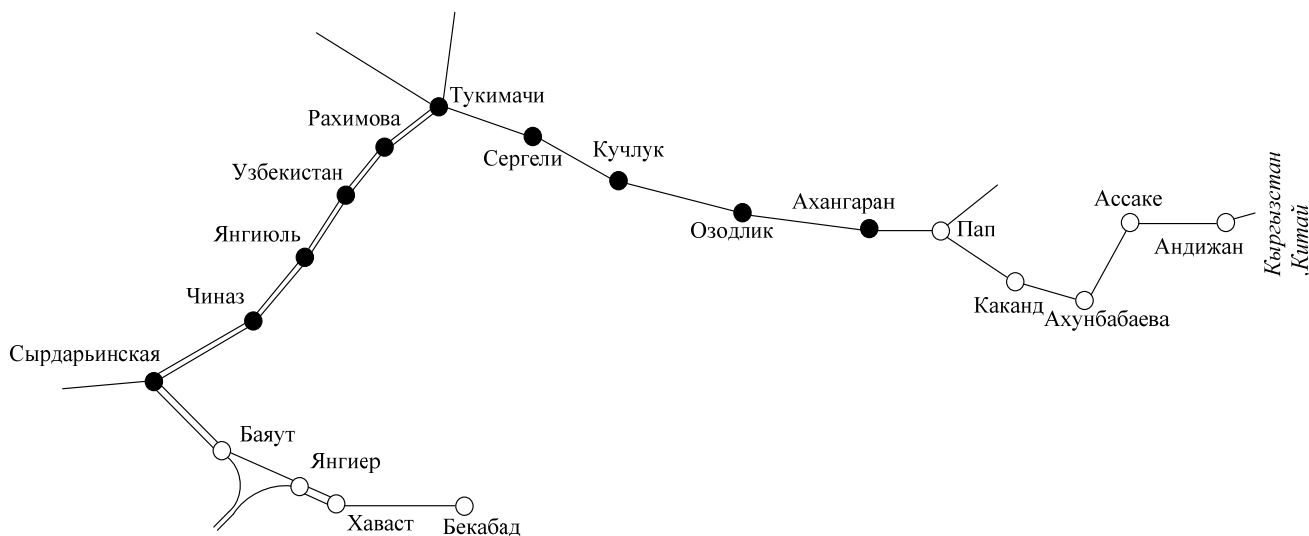


Рис. 1. Схема расположения железнодорожного участка Ахангаран-Сырдарьинская

Таблица 1.

### Техническая характеристика участков

№	Наименования перегонов	Длина участка, км	Норма массы поезда, т		Средства сигнализации связи
			Чет.	Нечет.	
1	Ахангаран – Азадлик	13	4500	5500	ПАБ
2	Азадлик – Тойтепа	15	4500	5500	ПАБ
3	Тойтепа – Кучлук	12	4500	5500	ПАБ
4	Кучлук – Жалоир	17	4500	5500	ПАБ
5	Жалоир – Сергели	4	4500	5500	ПАБ
6	Сергели – Тукимачи	8	4500	5500	ПАБ
7	Тукимачи – Рахимова	4	5500	5500	АБ
8	Рахимова – Уртааул	9	5500	5500	АБ
10	Уртааул – Узбекистан	4	5500	5500	АБ
11	Узбекистан – Янгиюль	7	5500	5500	АБ
12	Янгиюль – Пахта	15	5500	5500	АБ
13	Пахта – Алмазар	9	5500	5500	АБ
14	Алмазар – Чиназ	9	5500	5500	АБ
15	Чиназ – Новый Чиназ	7	5500	5500	АБ
16	Новый Чиназ – Сырдарьинская	8	5500	5500	АБ

Примечание: ПАБ –полуавтоматическая блокировка, АБ – автоматическая блокировка.

**3. Определение провозной способности.** Наличие пропускная способность однопутных участков, не оборудованных автоблокировкой, определяется в парах поездов по формуле:

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{мех}}) \cdot \alpha_n}{T_{\text{пер}}} = \frac{(1440 - t_{\text{мех}}) \cdot \alpha_n}{\sum t_x + \tau_a + \tau_b} \text{ пар поездов (1)}$$

где  $T_{пер}$  – период графика движения, мин.;  $\sum t_x$  – суммарное время хода пары поездов по ограничивающему перегону с учетом их разгонов и замедлений, мин.;  $\tau_a, \tau_b$  – соответственно станционные интервалы по отдельным пунктам, а и б, мин.;  $t_{мех}$  – продолжительность суточного бюджета времени, выделяемого для производства плановых ремонтно-строительных работ, мин.;  $\alpha_n$  – коэффициент, учитывающий надежность работы тех-

нических средств (инфраструктуры и подвижного состава); 1440 – количество минут в сутках.

При частично-пакетном графике величина пропускной способности существенно зависит от коэффициента пакетности  $\gamma_{пак}$ , представляющего собой отношение числа поездов, пропускаемых в пакетах, к общему числу поездов, а также от количества поездов, пропускаемых в одном пакете, «K».

$$N_{нал} = \frac{K \cdot (1440 - t_{мех}) \cdot \gamma_{пак}}{[K + (K - 1) \cdot \gamma_{пак}] \cdot (t' + t'' + \tau_a + \tau_b) + (K - 1) \cdot (J'_p + J''_p) \cdot \gamma_{пак}} \text{ пар поездов,} \quad (2)$$

где  $K$  – количество пропускаемых в одном пакете поездов;  $\gamma_{пак}$  – коэффициент пакетности;  $t', t''$  – времена хода соответственно четных и нечетных поездов между отдельными пунктами;  $\tau_a, \tau_b$  – станционные интервалы по ограничивающим станциям расчетного перегона;  $J'_p, J''_p$  – соответственно расчетные интервалы между попутными четными и нечетными поездами в пакете.

Провозная способность зависит от пар поездов

$$G_{нал} = \frac{365 \cdot N_{нал} \cdot Q_{бр} \cdot \varphi_n}{10^6}, \text{ млн т/год} \quad (3)$$

где  $N$  – наличная пропускная способность грузового движения;  $Q_{бр}$  – средняя масса поезда брутто, зависящая от установленной нормы массы поезда и структуры грузопотока;  $\varphi_n$  – отношение массы поезда нетто к массе поезда брутто, зависит от рода вагонов и структуры вагонопотока; 365 – количество дней в году.

На рис. 2 представлены изменения провозной способности участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская в зависимости от существующей и необходимой пропускной способности данного участка и расчетные значения уровней, полученные на основе двух моделей: линейной и параболической [14].

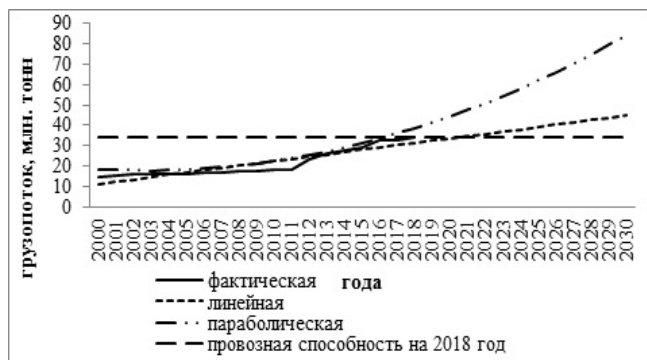


Рис. 2. График изменения провозной способности участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская

На графике можно увидеть увеличение провозной способности на участке Ахангаран-Тукимачи с 2000 г. по 2030 г. На увеличение грузопотока в 2012 г. повлияла электрификация линии, а также ввод в действие Ан-

гренского логистического центра, обслуживающий крупные предприятия Ферганской долины, такие как, Ассакинский автомобильный завод, Ферганский нефтеперерабатывающий завод и другие народнохозяйственные предприятия. Ввод в эксплуатацию 2016 г. линии Ангрэн-Пап повлиял на рост грузопотока на данном участке. В перспективе, строительство железнодорожного направления Китай-Кыргызстан-Узбекистан также повлияет на увеличение грузопотока в разы. Кроме того, с каждым годом увеличивается число пассажирских поездов местного и дальнего следования. В диаграмме показана провозная способность для каждого этапа технического и технологического развития участка с учетом существующей и необходимой пропускной способностей. Рост грузопотока к 2030 г. требует усиления пропускной способности однопутной линии и сооружения второго главного пути или строительства новой железнодорожной линии Ахангаран-Сырдарьинская. Характер последовательного развития железнодорожных участков с учетом изменения существующей и необходимой пропускной способностей с течением времени может изменяться (расти) непрерывно (см. рис. 3) [6].

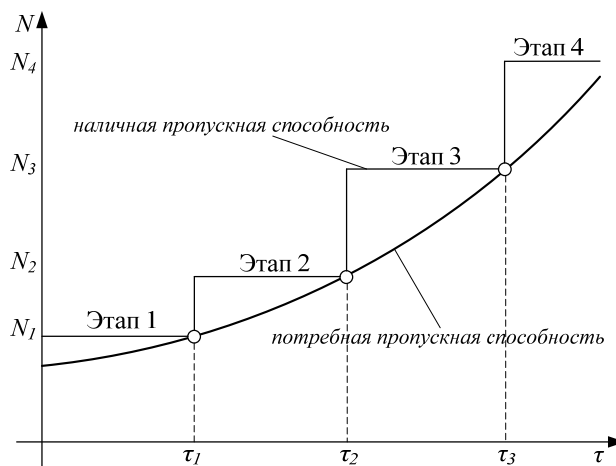


Рис. 3. Характер поэтапного развития железнодорожных участков

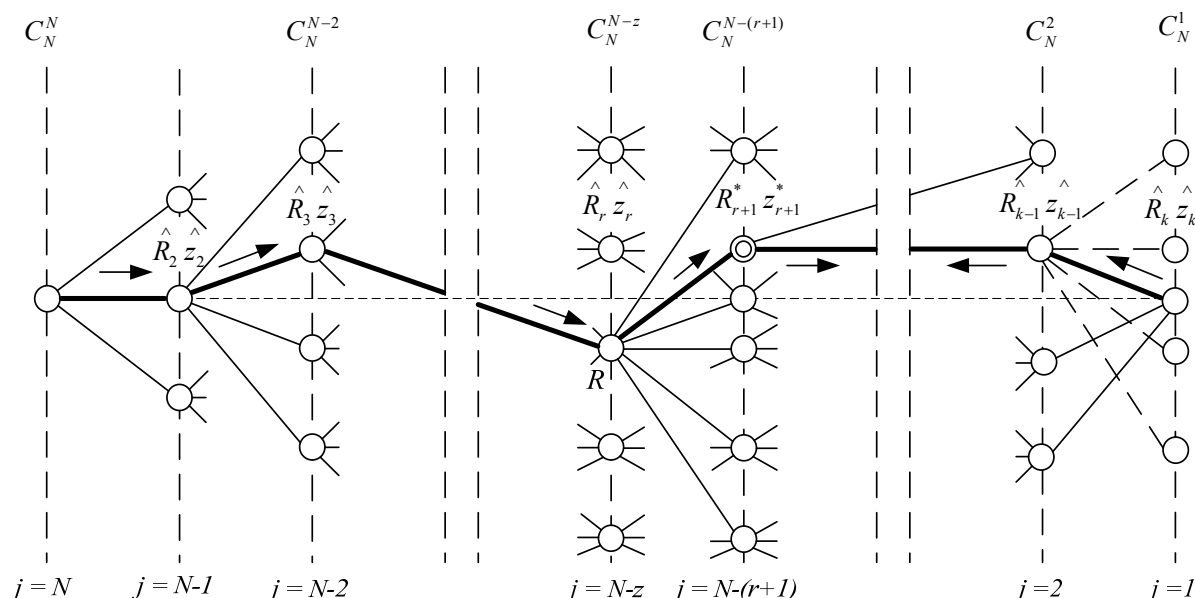


Рис. 4. Граф поиска рационального варианта увеличения пропускной способности

**3. Методология исследования.** На рис. 4 изображен полностью замкнутый направленный граф, наглядно иллюстрирующий описанный вычислительный процесс. Для упрощения структуры графа при его построении не учитывается индекс  $k$ , фиксирующий род груза [15].

По горизонтали (ось абсцисс) помечены позиции, соответствующие последовательно изменяющимся значениям  $j$ ; по вертикали (ось ординат) для каждого  $j$  указаны узлы графа. Число узлов графа, соответствующих условно оптимальным значениям  $\hat{z}_j$ , определяется числом сочетаний  $C_N^{N-r}$  или  $C_N^{N-r}/N$ . В узлах графа приводятся условно оптимальные значения целевой функции  $\hat{R}_j$ .

Критический путь, отмеченный жирной линией, начинается в одной точке, для которой  $j = N$ , и заканчивается точкой, в которой  $j = 1$ . Этот путь указывает на процесс и направление поиска. На данном пути находится узел графа, отвечающий оптимальным параметрам структуры парка  $\{j^*\}$  и  $z^* = \{z_j^*\}$ . Можно осуществить поиск через узлы во встречном направлении (от точек  $j = N$  и  $j = 1$ ).

**4. Выбор возможных состояний технического оснащения железнодорожного участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская.** На сегодняшний день резерв пропускной способности железнодорожного участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская варьируется в среднем от 5-10 пар поездов. Если быть точнее, то участок Ахангаран – Тукимачи от 0 – до 5 пар поездов, а участок Тукимачи – Сырдарьинская от 11 пар поездов и выше. Это в первую очередь зависит от рельефа местности, станционных путей, а также от системы регулирования интервалом между поездами (см. таблицу 1). Однако, при значительных грузопотоках после запуска железнодорожного направления Китай-Кыргызстан-Узбекистан могут резко возрасти простои поездов на технических станциях, в ожидании пропуска по ограничивающему участку, который приводит к

срыву сроков доставок грузов. В дальнейшем наступит момент, когда однопутная линия (Ахангаран-Тукимачи) не сможет освоить растущий грузопоток. Для выбора мероприятий, направленных на увеличение пропускной способности в таблице 2 приведены все возможные варианты.

Выбор мероприятий основывается на следующих технических и технологических решениях:

- необходимость увеличения полезной длины приемоотправочных путей. На сегодняшний день некоторые станционные пути имеют длину меньше 850 м, что сильно влияет на пропускную способность. Здесь же можно отметить, неэффективность дальнейшего удлинения полезной длины приемоотправочных путей на 1250 м из-за перелома веса в меньшую сторону до 2600 т до станции Пап (см. таблицу 1);
- необходимость строительства дополнительных раздельных пунктов. Средняя длина перегона примерно 12 км, что также влияет на пропускную способность участка. Возникает необходимость строительства разьезда на ограничивающем перегоне Кучлук–Жалоир;
- строительство второй железнодорожной линии;
- в таблице 1 видно, что часть участка Ахангаран-Сырдарьинская оборудована полуавтоматической блокировкой, что потребует перехода с полуавтоматической блокировкой на автоблокировку;
- также рассматривается целесообразность использования автоблокировки с частично-пакетным графиком движения поездов.

Указанные способы повышения пропускной и провозной способностей могут быть осуществлены в различных сочетаниях этапности, исходя от конкретных условий работы исследуемого участка. В каждом конкретном случае имеется вполне определенная оптимальная очередность проведения возможных мероприятий и наиболее целесообразное рассредоточение по срокам. При этом общие перевозочные затраты будут минимизированы за весь период эксплуатации линии, вплоть до переустройства в двухпутную.

## Возможные характеристики состояний железнодорожного участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская

I	Ахангаран – Тукимачи, однопутная железнодорожная линия, оборудованная полуавтоматической блокировкой (ПАБ). Полезная длина меньше 850 м (условная длина поезда составляет 54 вагона)
II	Ахангаран – Тукимачи, однопутная железнодорожная линия, оборудованная ПАБ. Полезная длина приемоотправочных путей – 850 м (условная длина поезда составит 57 вагона)
III	Строительство разъезда на ограничивающем перегоне Кучлук–Жалоир с полезной длиной приемоотправочных путей – 850 м.
IV	Ахангаран – Тукимачи, однопутная железнодорожная линия, перевод с ПАБ на автоблокировку (АБ), с $\gamma_{\text{пак}}=0$ . Полезная длина приемоотправочных путей – 850 м.
V	Ахангаран – Тукимачи, однопутная железнодорожная линия, перевод с ПАБ на АБ, с $\gamma_{\text{пак}}=0,3$ . Полезная длина приемоотправочных путей – 850 м.
VI	Ахангаран – Тукимачи, однопутная железнодорожная линия, перевод с ПАБ на АБ, с $\gamma_{\text{пак}}=0,6$ . Полезная длина приемоотправочных путей – 850 м.
VII	Ахангаран – Тукимачи, однопутная железнодорожная линия, оборудованная АБ, с $\gamma_{\text{пак}}=0$ . Полезная длина приемоотправочных путей – 1050 м.
VIII	Ахангаран – Тукимачи, однопутная железнодорожная линия, оборудованная АБ, с $\gamma_{\text{пак}}=0,3$ . Полезная длина приемоотправочных путей – 1050 м.
IX	Ахангаран – Тукимачи, однопутная железнодорожная линия, оборудованная АБ, с $\gamma_{\text{пак}}=0,6$ . Полезная длина приемоотправочных путей – 1050 м.
X	Строительство второй железнодорожной линии на участке Ахангаран – Тукимачи, оборудованной АБ
XI	Строительство новой однопутной электрифицированной железнодорожной линии Ахангаран-Сырдарьинская, оборудованной АБ

Для выбора из множества конкурентоспособных схем необходимо определить множество логических противоречивых состояний. Для участка Ахангаран-Сырдарьинская они проявляются в следующем:

6-7 противоречие в том, что на шестом этапе участок оборудуется автоблокировкой с коэффициентом пакетности  $\gamma_{\text{пак}}=0,6$ , а на седьмом этапе  $\gamma_{\text{пак}}=0$ .

6-8 противоречие в том, что на шестом этапе участок оборудуется автоблокировкой с коэффициентом пакетности  $\gamma_{\text{пак}}=0,6$ , а на седьмом этапе  $\gamma_{\text{пак}}=0,3$ .

На основе вышесказанных соображений и приведенных формул (1), (2), (3) приведены возможные схемы развития железнодорожного направления Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская (см. рис. 5) [14].

Далее в работе приводится граф вариантов схем развития участка Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская (см. рис. 6) имеется множество схем с начальным состоянием  $C_1$  и с конечным  $C_{911}$ . В таблице 3 приведен фрагмент перечней конкурентоспособных схем.

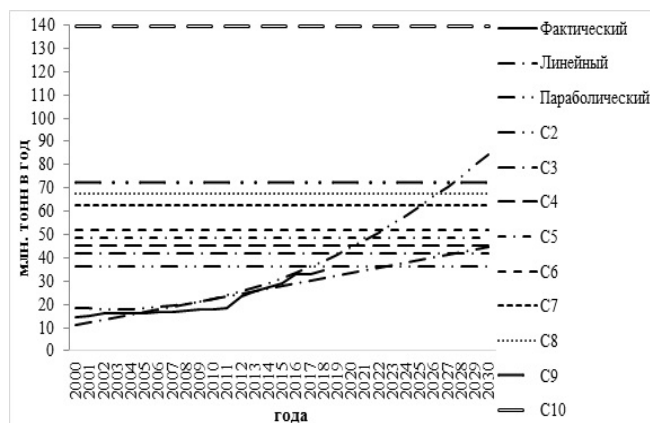


Рис.5. Возможные схемы развития железнодорожного направления Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская

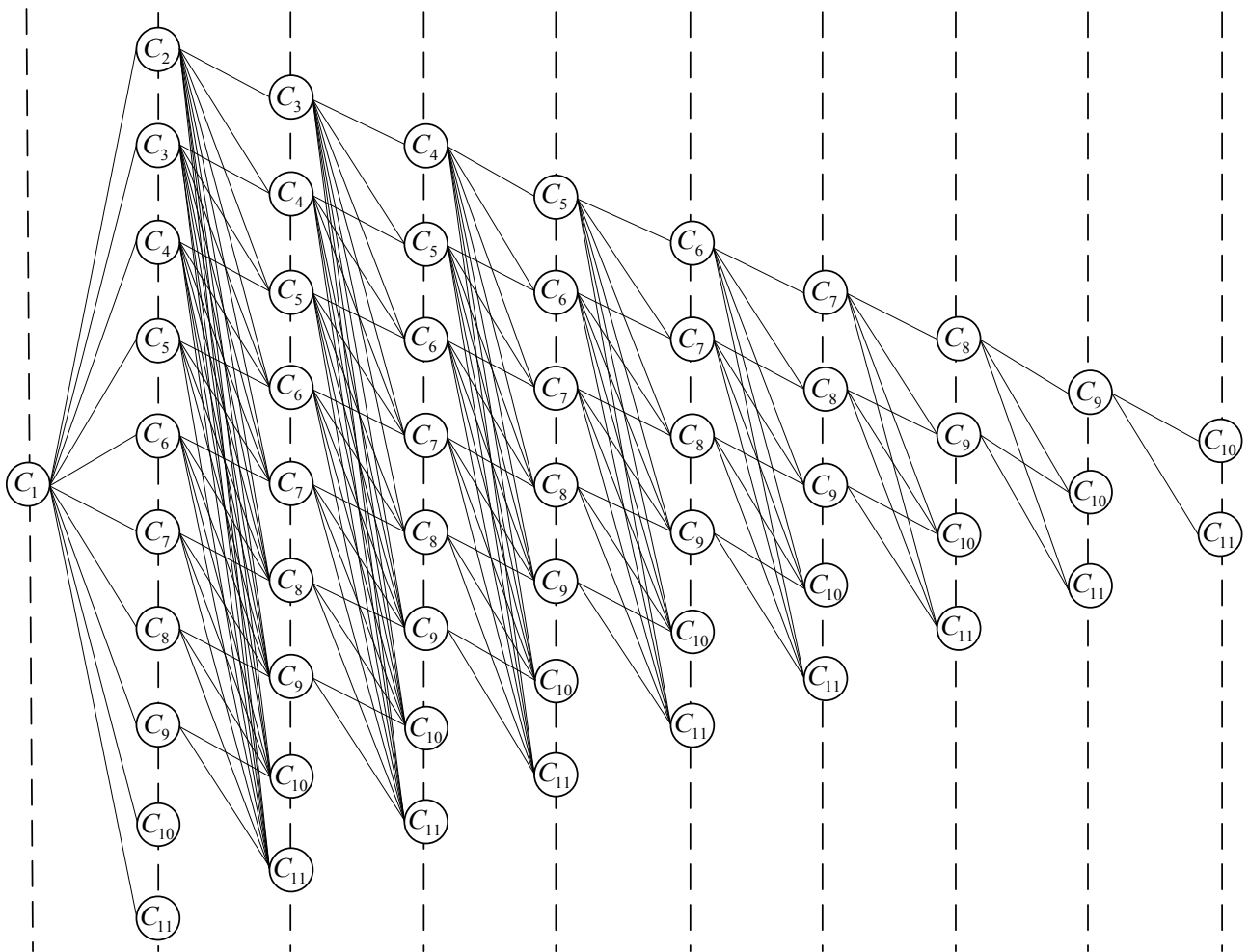


Рис. 6. Граф поиска рационального варианта увеличения пропускной способности железнодорожного направления Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская

Таблица 3.

**Схемы развития исследуемого участка (Фрагмент таблицы)**

№ схемы	Возможные схемы развития	№ схемы	Возможные схемы развития
$S_1$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_7-C_8-C_9-C_{10}$	$S_8$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_7-C_{11}$
$S_2$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_7-C_8-C_9-C_{11}$	$S_9$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_8-C_9-C_{10}$
$S_3$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_7-C_8-C_{10}$	$S_{10}$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_8-C_9-C_{11}$
$S_4$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_7-C_8-C_{11}$	$S_{11}$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_8-C_{10}$
$S_5$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_7-C_9-C_{10}$	$S_{12}$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_8-C_{11}$
$S_6$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_7-C_9-C_{11}$	$S_{13}$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_{10}$
$S_7$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_7-C_{10}$	$S_{14}$	$C_1-C_3-C_4-C_5-C_6-C_{11}$

На графе вариантов схем поэтапного развития исследуемого участка имеется многочисленные схемы с начальным состоянием  $C_1$  и с конечным  $C_{10}$ . В таблице 3 приведен фрагмент перечня возможных схем.

**5. Обсуждение результатов.** Предложенное в данном исследовании развитие нового железнодорожного

участка Ахангаран-Сырдарьинская является одним из приоритетных, т.к. обеспечивает возможность уменьшения сроков доставок. Этот вариант представляет гипотенузу треугольника с катетами Сырдарьинская – Тукимачи и Тукимачи-Ахангаран (см. рис. 7).

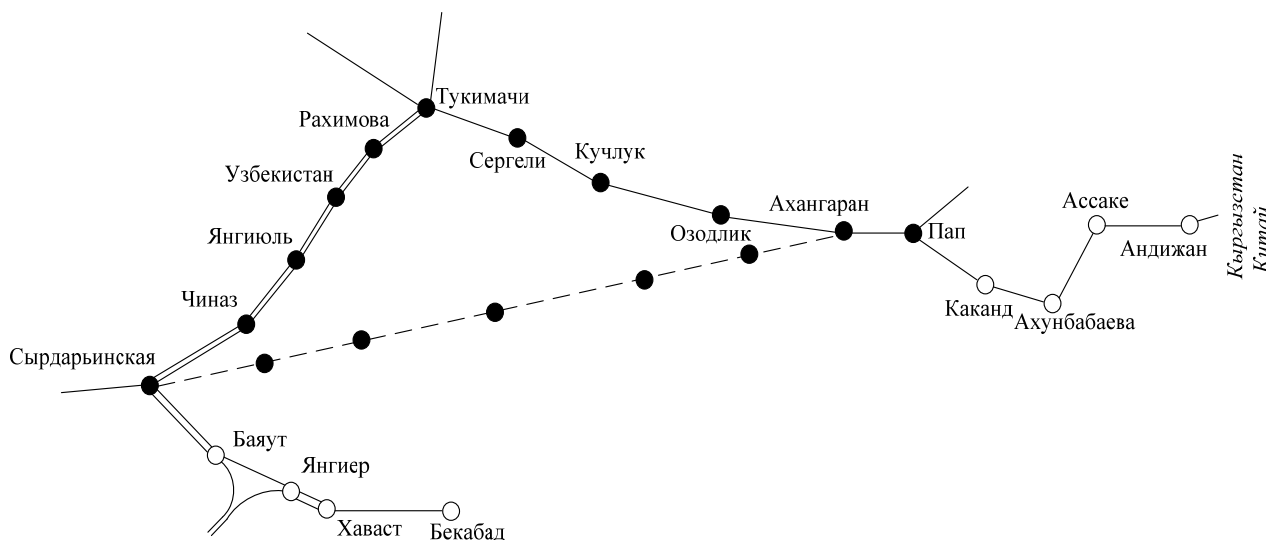


Рис. 7. Пример плана нового железнодорожного участка Ахангаран-Сырдарьинская

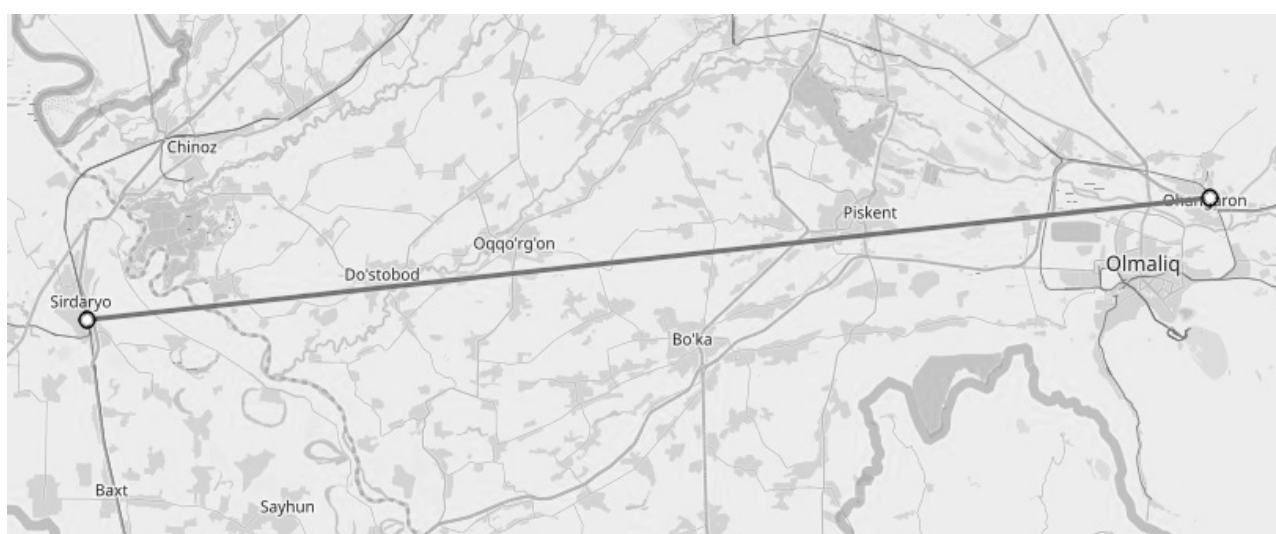


Рис. 8. Условный план железнодорожного участка Ахангаран-Сырдарьинская (Режим Карта)

Трасса нового участка Ахангаран-Сырдарьинская могла бы быть идеальной, если представляла собой прямую линию как в плане (см. рис. 8), длина которой составляет 82,9 км.

Однако это не всегда возможно из-за подходов к населенным пунктам или городам, таким как Дустабад, Аккурган и Пскент (см. рис. 8). Это также усложняется обходом естественных (реки и горы) и искусственных (Сардобинское водохранилище) препятствий и наличия неровной поверхности, особенно со стороны станции Ахангаран.

**6. Выводы.** На основании проведенных исследований по обоснованию поэтапного развития железнодорожного направления Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская можно сделать следующие выводы:

1. При прогнозировании грузопотока обнаружилась, что в ближайшем будущем потребуется увеличение пропускной и провозной способностей существующей однопутной линии Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская, что в свою очередь, реализуемо при использовании мероприятий с меньшим объемом работ, чем сооружение второго главного пути.

2. Выполнен анализ всевозможных мероприятий для увеличения провозной способности с учетом возможного роста объемов перевозок.

3. Новый железнодорожный участок Ахангаран-Сырдарьинская позволит разгрузить мегаполис Ташкент, исключив простой автотранспорта на железнодорожных переездах, а также позволит оптимизировать грузопотоки.

4. Результаты исследования создадут условия для освоения перспективных объемов железнодорожных перевозок после ввода в эксплуатацию железнодорожного направления Китай-Кыргызстан-Узбекистан.

5. Новая железнодорожная линия обеспечит развития таких городов, как Дустабад, Аккурган и Пскент, а также региона в целом.

### Литература

1. Балжир Мунхдэлгэр. Обоснование освоение перспективных объемов перевозок на монгольской железной дороге [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.22.08 / Балжир Мунхдэлгэр. – СПб., 2016. – 128 с.
2. Балжир Мунхдэлгэр. Перспективное развитие участков монгольской железной дороги [Текст] / Балжир Мунхдэлгэр // Транспортное дело России, 2014. – Вып. 6. – С. 29-33.

3. Балжир Мунхдэлгэр. Перспективы Улан-Баторской железной дороги. Мир транспорта, 2014. – Т. 12. – Вып. 3. – № 52. – С. 148-155.
4. Батурин А.П. Выбор оптимального варианта развития Улан-Баторской железной дороги [Текст] / А.П. Батурин, Балжир Мунхдэлгэр // Мир транспорта, 2015. – Т. 13. – Вып. 2. – № 57. – С. 154-165.
5. Ефименко Ю. И. Обоснование этапности развития железнодорожных станций и узлов [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1992. 394 с.
6. Ефименко Ю.И. Метод этапности развития пассажирских технических станций / Ю.И. Ефименко, А.В. Сугоровский // Наука и техника транспорта, 2010. – Вып. 4. – С. 6-12.
7. Ефименко Ю.И. Обоснование рациональной этапности развития горловин железнодорожных станций [Текст] / Ю.И. Ефименко, М.В. Четчуев // Наука и техника транспорта, 2012. – Вып. 3. – С. 29-36.
8. Ефименко Ю.И. Обоснования рациональности этапности развития железнодорожных станций [Текст] / Ю.И. Ефименко, В.Л. Белозёров, М.В. Четчуев // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2012 – Вып. 2 – № 31 – С. 11-18.
9. Ефименко Ю.И. Обоснования рациональности этапности развития железнодорожных станций и узлов при наличии ограничений [Текст] / Ю.И. Ефименко, П.К. Рыбин, М.В. Четчуев // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2013 – Вып. 4 – № 37 – С. 25-30.
10. Ефименко Ю.И. Обоснования рациональности этапности развития железнодорожных станций и узлов при наличии альтернативных вариантов [Текст] / Ю.И. Ефименко, П.К. Рыбин, А.Г. Фелиппов, М.В. Четчуев // Известия Сибирского университета путей сообщения, 2018 – Вып. 3 – № 46 – С. 51-62.
11. Панова Ю.Н. Обоснования этапности развития тыловых контейнерных терминалов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 148с.
12. Панова Ю.Н. Экономическая оценка эффективности поэтапного развития тыловых контейнерных терминалов / Ю.Н. Панова // Инженерный вестник Дона, 2012 – Вып. 4-12. – № 22. – С. 58-63.
13. Панова Ю.Н. Этапность развития контейнерных терминалов при растущих объёмах работы [Текст] / Ю.Н. Панова, Е.К. Коровяковский, Г.М. Грошев // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2011 – Вып. 11 – № 29 – С. 7-15.
14. Сатторов С.Б. Определение потребной провозной способности на железнодорожном участке Ахангаран-Тукимачи-Сырдарьинская / С.Б. Сатторов, Ш.Г. Махматулов, Д.З. Икрамова, М.М. Дехконов // Вестник КемРИПК, 2019. – № 1. – С. 137-144.
15. Смехов А.А. Математические модели процессов грузовой работы [Текст] – М.: Транспорт, 1982. – 256 с.
16. Сугоровский А.В. Обоснование этапности развития пассажирских технических станций [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2010. 189 с.
17. Четчуев М.В. Обоснование этапности развития горловин железнодорожных станций [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 176 с.
18. Четчуев М.В. Этапность развития горловин железнодорожных станций [Текст] / М.В. Четчуев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2012 – Вып. 1. – № 45. – С. 167-176.
19. Ahuja, R. K., Jha, K. C., & Liu, J. (2007). Solving Real-Life Railroad Blocking Problems. *Interfaces*, 37(5), 404–419. doi:10.1287/inte.1070.0295.
20. Assad, A. (1981). Analytical Models In Rail Transportation: An Annotated Bibliography. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 19(1), 59–80. doi:10.1080/03155986.1981.11731807.
21. Assad, A. A. (1980). Models for rail transportation. *Transportation Research Part A: General*, 14(3), 205–220. doi:10.1016/0191-2607(80)90017-5.
22. Assad, A. A. (1980). Modelling of rail networks: Toward a routing/makeup model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 14(1-2), 101–114. doi:10.1016/0191-2615(80)90036-3.
23. Daganzo, C. F., Dowling, R. G., & Hall, R. W. (1983). Railroad classification yard throughput: The case of multistage triangular sorting. *Transportation Research Part A: General*, 17(2), 95–106. doi:10.1016/0191-2607(83)90063-8.
24. Fügenschuh, A., Homfeld, H., & Schülldorf, H. (2015). Single-Car Routing in Rail Freight Transport. *Transportation Science*, 49(1), 130–148. doi:10.1287/trsc.2013.0486.
25. Ghoseiri, K., Szidarovszky, F., & Asgharpour, M. J. (2004). A multi-objective train scheduling model and solution. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(10), 927–952. doi:10.1016/j.trb.2004.02.004.

#### Сведения об авторах:

**Илесалиев Дауренбек Ихтиярович**, доцент кафедры «Транспортная логистика и сервис» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

Узбекистан, 100067, Ташкент, ул. Одылходжаева 1.  
Тел. моб.: (+99897) 754-41-99.  
E-mail: ilesaliev@mail.ru.

**Сатторов Самандар Бахтиёрович**, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9.  
Тел.: (+7952) 373-21-37.  
E-mail: satorovsamandar100@gmail.com.

**Махматулов Шахобиддин Гиёсиддин угли** – аспирант кафедры инженерная логистика и менеджмент, Чаньяньский университет.

Китай, 710064, Сиань. ул. Наньер.  
E-mail: shoh1970@bk.ru.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ НА ГОРНО-ПЕРЕВАЛЬНОМ УЧАСТКЕ

**Доможирова А.Д.**,

кандидат пед. наук, доцент **Гончарова Н.Ю.**,

кандидат техн. наук, доцент **Упырь Р.Ю.**

(Иркутский государственный университет путей сообщения. ИрГУПС)

### RESEARCH OF RELIABILITY OF A RAILWAY LINE IN THE MOUNTAIN PASS SECTION

**A.D. Domozhirova,**

**N.Yu. Goncharova**, Ph.D. (Pedag.), Associate Professor,

**R.Yu. Upyr**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor

(Irkutsk State Transport University. IrGUPS)

*Пропускная способность, коэффициент надежности, перегон, задержка поездов, график движения поездов.*

*Throughput capacity, coefficient of reliability, railway stage, delay trains, timeline.*

*Приведены результаты исследования возникновения отказов и задержек поездов на горно-перевальном участке, определен коэффициент надежности для каждого перегона. Рассчитана пропускная способность и выявлены возможности «продвигать» поездопотоки. Представлен корреляционный анализ зависимости количества задержанных поездов от количества отказов выбранного для исследования участка.*

*The article presents the results of an analysis failures occurrence and trains delays on the mountain pass section. This made it possible to calculate the throughput and compare it with the available throughput in order to identify the reserve or lack of train flow ability. A correlation analysis of the dependence of the number of delayed trains of the number failures on of the section selected for research is presented.*

Как показывает практический опыт эксплуатационной работы, одним из самых тяжелых и грузонапряженных участков на Восточно-Сибирской железной дороге является горно-перевальный участок Большой Луг – Слюдянка, профиль пути которого характеризуется затяжным подъемом, а затем столь же затяжным спуском к Байкалу (с запада на восток) протяженностью 83 км. В настоящее время, движение поездов осуществляется с минимальными интервалами 8-10 мин., а для тяжеловесных поездов требуется использование подталкивающих локомотивов. Стоит также отметить, что эти ограничивающие факторы не отменяют задания на повышение в 1,5 раза пропускной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей к 2024 г., которое базируется на имеющейся пропускной способности участка и возможности «продвигать» поездопотоки.

Известны различные факторы, влияющие на величину пропускной способности:

- техническое оснащение и надёжность устройств станций, перегонов (количество станционных путей, средства автоматики и связи, схемные станционные решения, профиль пути, мощность локомотивного хозяйства и др.);

- организация технологии работы станций, диспетчерских участков, депо и др.;

- внешние факторы, не подлежащие корректировке (погодно-климатические условия);

- человеческий фактор (компетентность персонала, руководящего работой станции, участков).

В общепринятом представлении, пропускная способность отражает возможность удовлетворить потребности в перевозках заданных объёмов грузов и является индикатором производительности системы железнодорожного транспорта. Потребность в бесперебойном продвижении поездопотоков остаётся ключевой на сегодняшний день, так как сохраняется высокий уровень погрузки. К примеру, погрузка в 2013 г. по всей сети дорог составила 1237 млн т, а в 2017 – 1261 млн т., дальность перевозки увеличилась с 1776 км до 1977 км. В связи с этим исследование вопросов увеличения пропускной и провозной способности железных дорог является актуальным на сегодняшний день.

#### Способы определения пропускной способности на горно-перевальном участке

Прирост показателей пропускной и провозной способностей станций и участков, в настоящее время, осуществляется чаще всего за счёт проведения организационно-технических мероприятий, не требующих больших капитальных вложений. Такие мероприятия возможно проводить при полном и точном подсчёте имеющейся мощности железнодорожных объектов, пропускающих и обрабатывающих поезда. При определении необходимых мероприятий по повышению пропускной способности, их основой является корректный расчёт имеющейся величины способности железнодорожного транспорта «продвигать» поездопотоки.

Важнейший шаг к разработке технологии расчёта пропускной способности выполнил В.Е. Козлов в 70-х



годах прошлого века [1]. В результате исследований были сделаны выводы о том, что отказы технических средств существенно влияют на эксплуатационную работу станций, узлов и перегонов. Благодаря исследованиям В.Е. Козлова, в расчет наличной пропускной способности введен понижающий коэффициент - коэффициент надежности технических средств  $\alpha_n$  [2].

Впоследствии, в нормативных документах [3] была введена величина ( $t_{\text{тех}}$ ), которая принималась равной продолжительности «технологических окон», закладываемых в нормативный график движения поездов. Данная величина ( $t_{\text{тех}}$ ) зависит от технологии ведения работ, числа главных путей и типа применяемых машин и механизмов.

В настоящее время расчет пропускной способности осуществляется согласно действующим нормативным документам [4], однако, корректность данной технологии можно поставить под сомнение. Так, Д. Ю. Левиным установлено [5], что причинами отклонения реальной пропускной способности железнодорожного участка от теоретической, являются использование постоянных величин в расчетной формуле определения пропускной способности и отсутствие учета характеристик потока поездов [1]. Согласно [4], наличная пропускная способность определяется из выражения:

$$N = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) * \alpha_n}{I}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{тех}}$  – продолжительность суточного бюджета времени, выделяемого для производства плановых ремонтно-строительных работ, мин. (для однопутных линий равной 75 мин., линий с двухпутными вставками – 90 мин. и для двухпутных – 150 мин.);

$\alpha_n$  – коэффициент, учитывающий надежность работы технических средств: инфраструктуры и подвижного состава (на электрифицированных однопутных линиях 0,93, а при тепловозной тяге 0,92; на двухпутных линиях величина коэффициента надежности принимается при электротяге 0,96, а при тепловозной тяге – 0,95).

Рассматривая выражение (1) можно сделать вывод, что значения  $\alpha_n$  являются условно постоянными [4] и не учитывают индивидуального технического состояния перегонов и станций.

Опираясь на имеющийся опыт определения коэффициента надежности, как функции количества отказов, в таблице 1 приведены соответствующие данные (таблица 1).

Таблица 1.

**Количество отказов и задержанных поездов за год**

Порядковый номер перегона на горно-перевальном участке	Количество отказов (x)	Количество задержанных поездов (y)
1	0	0
2	1	1
3	11	64
4	30	499
5	12	69
6	16	265
7	39	745
8	54	1097
9	2	9
Всего:	165	2749

На рис. 1 приведены результаты корреляционного анализа показателей количества отказов и количества задержанных поездов.

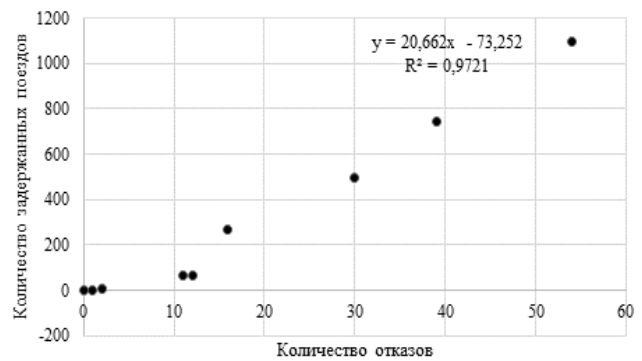


Рис. 1. Результаты корреляционного анализа взаимосвязи количества задержанных поездов от количества отказов

Анализируя полученные значения (при коэффициенте корреляции равном 0,9721), можно сделать вывод о том, что число задержанных поездов на участке имеет тесную взаимосвязь с количеством отказов, и соответствует линейному характеру поведения системы на 97%. Корреляционные зависимости исследуемых величин показывают сильную статистическую взаимосвязь количества задержанных поездов от количества отказов согласно интерпретации значений коэффициента корреляции (таблица 2).

Таблица 2.

**Интерпретация значений коэффициента корреляции**

№ п/п	Значение коэффициента корреляции	Интерпретация значения
1	$ r  = 1$	Функциональная зависимость
2	$0,7 \leq  r  \leq 0,99$	Сильная статистическая взаимосвязь
3	$0,5 \leq  r  \leq 0,69$	Средняя статистическая взаимосвязь
4	$0,2 \leq  r  \leq 0,49$	Слабая статистическая взаимосвязь
5	$0,09 \leq  r  \leq 0,19$	Очень слабая статистическая взаимосвязь
6	$ r  = 0$	Взаимосвязь отсутствует

На рис. 2 представлен график зависимости отказов и задержанных поездов, за исследуемый период в 12 месяцев.

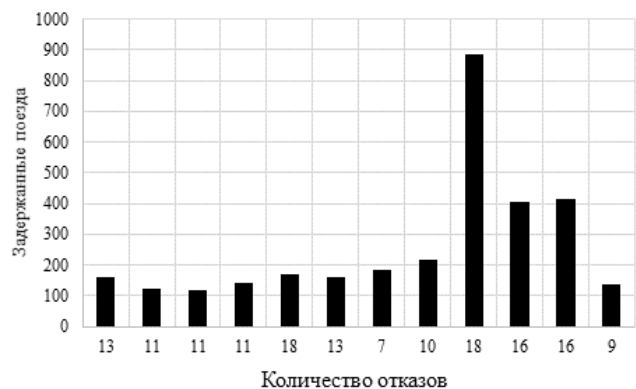


Рис. 2. График возникновения отказов за период 12 месяцев на горно-перевальном участке

При расчете пропускной способности, можно использовать технологию, основанную на учете времени восстановления функционирования технического средства после отказа (расчетная пропускная способность). Тогда, согласно [6], выражение для расчета пропускной способности примет вид:

$$N_{\text{рас}} = e^{-\lambda} * \frac{1440 - t_{\text{тех}}}{I} + \lambda * e^{-\lambda} * \left( \frac{140 - t_{\text{тех}} - \tau}{I} \right), \quad (2)$$

где I – межпоездной интервал;

$\lambda$  – интенсивность возникновения отказов за сутки;

e – число Эйлера.

$$\lambda = \frac{n}{t}, \quad (3)$$

где n – количество отказов;

t – продолжительность периода, за который производится расчет, сут.;

$\tau$  – среднее время восстановления функционирования участка после одного отказа, мин.:

$$\tau = \frac{1}{\mu} * (1 - e^{-\mu}), \quad (4)$$

где  $\mu$  – параметр восстановления:

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{восст}}}, \quad (5)$$

где  $t_{\text{восст}}$  – время восстановления, мин.

Используя (2)-(5), получим выражение для расчета коэффициента надежности инфраструктуры и подвижного состава:

$$\alpha_n = e^{-\lambda} + \frac{\lambda * (140 - t_{\text{тех}} - \tau)}{(1440 - t_{\text{тех}}) * e^{\lambda}}, \quad (6)$$

где N – наличная пропускная способность участка без учета надежности инфраструктуры и подвижного состава.

### Определение надежности работы горно-перевального участка

Основываясь на выше изложенную технологию, и используя статистические данные, определим интенсивность возникновения отказов и параметры восстановления рассматриваемой системы [7]. Данные расчетов сведем в таблицу 3.

Таблица 3.

### Отказы по перегонам на горно-перевальном участке

Перегон, номер	Число отказов за указанный период	Время восстановления, мин.	Интенсивность возникновения отказов за сутки, $\lambda$	Параметр восстановления, $\mu$
1	0	0	-	-
2	1	14	0,0028	0,0715
3	11	1867	0,0302	0,0006
4	30	2083	0,0822	0,0005
5	12	311	0,0329	0,0033
6	16	1534	0,0439	0,0007
7	39	2961	0,1069	0,0004
8	54	3426	0,1479	0,0003
9	2	80	0,0055	0,0125

Используя выражения (2) и (6), определим потребность в пропускной способности каждого перегона с учетом расчетного коэффициента надежности. Данные расчета сведем в таблицу 4.

Таблица 4.

### Расчетные коэффициенты надежности

Порядковый номер перегона на горно-перевальном участке	Расчётная пропускная способность, $N_{\text{рас}}$	Коэффициент надежности, $\alpha_n$	Избыток/недостаток пропускной способности при расчетном коэффициенте надежности, $\Delta N$
1	143,3333	1	-
2	142,9249	0,9972	5,3321
3	139,0282	0,9699	4,2847
4	131,5711	0,9205	-5,6732
5	138,6488	0,9674	1,0489
6	137,1254	0,9567	-0,4745
7	128,6753	0,8978	-8,9246
8	139,5916	0,8615	-15,8948
9	128,2757	0,9944	4,4357

На выбранном для исследования участке перегонами с самыми низкими коэффициентами надежности являются перегоны № 4, 6, 7, 8 (рис. 3).

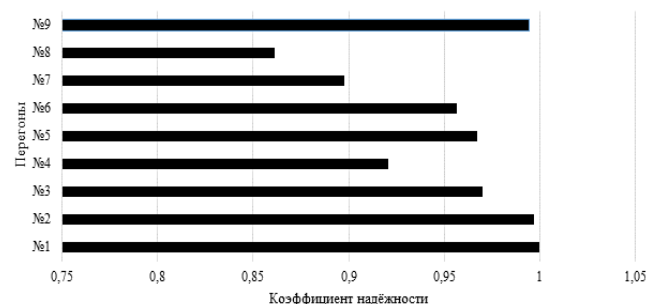


Рис. 3. Расчётные коэффициенты надёжности перегонов

При рассмотрении причин возникновения отказов, можно зафиксировать следующие факторы: чаще всего возникают неисправности изолирующих стыков; гибкого фиксатора контактной сети; дугогасительной камеры вакуумного выключателя, рамы токоприемника, якоря тягового двигателя постоянного тока, силовых контактов электромагнитного контактора силовой цепи; тормозной магистрали грузового вагона, резервуаров грузового вагона, буксового узла грузового вагона, воздухораспределителя грузового вагона; линзового светофора, реле аппаратуры автоблокировки. Из этого следует, что причина возникновения отказа представляет собой системную проблему, и в совокупности может быть сопоставлена и определена некоторым уровнем нагрузки на инфраструктуру (грузонапряженностью линии).

Анализируя полученные данные, можно прийти к выводу, что использование одного и того же значения коэффициента надежности – 0,96 для электрифицированных двухпутных линий не всегда приводит к точному расчету пропускной способности, а это, в свою очередь, не позволяет в полной мере оценить возможную мощность участка в продвижении поездопотоков. Так, согласно полученным данным, если для перегонов № 2, 3, 5, 9 имеется некоторый резерв пропускной способности, то для перегонов № 4, 6, 7 и 8 значения пропускной способности составили меньшие значения по сравнению с расчетами (нормативным коэффициентом), что

приводит к некорректному соотношению наличной пропускной способности с потребной, и как следствие вызывает неравномерность поездопотока, что, в свою очередь, влияет на задержки и простои поездов.

#### **Заключение**

Совершенствование технологии увеличения пропускной способности горно-перевального участка требует детализированных расчетов и пересмотра идеологии организации движения поездов с учетом особенностей индивидуального технического состояния перегонов и станций. Повышение грузонапряженности линии может привести к увеличению потока отказов из-за повышения уровня нагрузок, воздействующих на инфраструктуру, которые ранее не принимались во внимание [8,9]. Данный горно-перевальный участок является узким местом Восточного полигона, который ограничивает пропускную способность ввиду сложного профиля. Именно поэтому надежность технических средств следует увеличивать в разы по сравнению с другими участками с наиболее благоприятными профилями, ведь цена отказа на участке Большой Луг – Слюдянка очень высока.

Перспективным направлением развития методов повышения пропускной способности на рассматриваемом участке, является применение интервального регулирования движения поездов на уровне 4-6 минутного интервала с уменьшением массы поезда и изменением технологии пропуска пассажирских поездов на Восточном полигоне в целом [10].

#### **Литература**

1. Козлов В.Е. Пропускная способность железнодорожных линий и надежность технических устройств // Вестник ВНИИЖТ.-1979, № 4.- С. 1-6.
2. Макарович А.М., Дьяков Ю.В. Использование и развитие пропускных способностей железных дорог. М.: Транспорт, 1981.- 287 с.
3. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. М., 1991.
4. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог, утвержденная ОАО «РЖД».- 2010.- 289 с.
5. Осьминин А.Т. Проблемы и пути их научного решения в вопросах эксплуатации железных дорог // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД».- 2015, № 4.- С. 41-54.

6. Зябиров Х.Ш., Шапкин И.Н. Эксплуатационная деятельность на железнодорожном транспорте (теория, практика, перспектива). М.: Желдориздат, 2009.- 300 с.

7. Полякова М.Н. Метод расчета наличной пропускной способности грузонапряженного двухпутного железнодорожного участка с учетом влияния надежности входящих в него перегонов и станций // Вестник ВНИИЖТ. – 2013, № 2.- С. 44-49.

8. Упырь Р.Ю., Давыдова Н.В., Хурэлбаатар Ц. Возникновение и оценка динамического взаимодействия груза и вагона // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- 2018, № 1 (57).- С. 8-15.

9. Упырь Р.Ю. Возможности учета дополнительных упругих связей в математических моделях размещения и крепления двух грузов на железнодорожной платформе // Транспортная инфраструктура Сибирского региона.- 2017, Т. 1.- С. 100-102.

10. Бархатов П.И., Упырь Р.Ю. Анализ влияния перекрестных технологических процессов при работе с пассажирскими поездами // Транспортная инфраструктура Сибирского региона.- 2019, Т. 1.- С. 48-51.

#### **Сведения об авторах:**

**Доможирова Алёна Дмитриевна** – старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения.

Телефон 89526346560;

e-mail: zenitALENA@mail.ru.

**Гончарова Наталья Юрьевна** – доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения.

Телефон 89643584186;

e-mail: gonnatally@mail.ru.

**Упырь Роман Юрьевич** - доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения.

Телефон 68914899962;

e-mail: upur\_ru@irgups.ru.

Адрес: 664074 Иркутск ул. Чернышевского 15.

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СИСТЕМЫ И НАПОЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ В ЛОГИСТИКЕ**Кандидат техн. наук **Тиверовский В.И.**

(Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук. ВИНТИ РАН)

**STATE-OF-THE-ART TECHNOLOGIES, SYSTEMS AND FLOOR VEHICLES IN LOGISTICS****V.I. Tiverovsky, Ph.D. (Tech.)**

(All-Russian Institute for Scientific and Technical Information. VINITI RAS)

*Логистика. Цифровизация и автоматизация. Системы управления. Напольный транспорт. Роботы и роботизация.*

*Logistics. Digitalization and automation. Control systems. Floor vehicles. Robots and robotization.*

*Представлены инновационные технологии и системы в логистике. Отмечены пути цифровизации и автоматизации. Большое внимание уделено транспортным системам с тележками без водителей, а также использованию роботов в складской логистике.*

*The article presents innovative technologies and systems in logistics. The digitalization and automation trends are discussed. Much attention is paid to transportation systems with driverless cars as well as use of robots in warehousing logistics.*

В Германии сложилась практика регулярного проведения общегерманских конгрессов по логистике на которых обсуждаются наиболее актуальные вопросы развития отрасли, отмечаются достижения и ставятся новые цели. В октябре 2019 г. в г. Берлине состоялся организованный Федеральным союзом логистики (BVL) 36-й общегерманский конгресс по логистике, в работе которого приняли участие рекордное число специалистов - 3027 участников, ученых, специалистов, представителей деловых кругов и инженерной общественности. Работа конгресса еще раз показала, как логистика выступает как флагман цифровых преобразований в экономике в целом. Под общим девизом *Mutig machen* ("Мужественно сделаем!") в центре внимания конгресса была концепция 4-й промышленной революции, искусственный интеллект, автоматические транспортные средства, электромобильность, безбумажные технологии в складской логистике, автоматизация и роботизация, логистические цепи поставок и др. современные направления развития. В Германии в сфере логистики работают 3,2 млн человек, годовой оборот составляет в 2019 г. порядка 279 млрд евро и из года в год растет темпом не ниже 2%. Национальной премии за лучший проект логистики в стране *Logistics Next* удостоена группа *BMW Group*, широко известная своими достижениями в области цифровизации и автоматизации в логистике [1].

Развитие логистики в свете концепции 4-й промышленной революции (*Industrie 4.0*) и соответственно концепции развития логистики (*Logistik 4.0*) предусматривает цифровизацию, автоматизацию, гибкость, соединение в цепь производства и логистики, интеграцию и роботизацию. Под этим углом зрения следует рассматривать эффективность и соответствие этим требованиям действующих автоматизированных систем управления (*LVS, WMS*). По мнению специализированной фирмы *PSI Logistics* (Германия) целый ряд действующих в настоящее время автоматизированных систем таким требованиям не удовлетворяют. Нужны новые

подходы, новые системы, новые алгоритмы. Исходя из этого фирма открыла специальный сайт *PSI Logistics Suite*, на котором представлена концептуальная основа цифровизации в логистике *PSI Java Framework* и новые программные разработки *PSI-Click-Design, PSI Fels, PSI Global* и др., отвечающие современной концепции. При этом новые программы через интерфейсы могут успешно взаимодействовать с действующими системами, например, с системой планирования и управления материальными ресурсами (*ERP*) [2].

Цифровизация и автоматизация внутренней логистики требует совершенной организации работы с данными в реальном времени. При этом направлении развития количество данных интенсивно увеличивается. Данные требуют актуализации, структуризации и семантического анализа. В результате должен быть переход от состояния "Много данных" (*Big Data*) к состоянию "Умные данные" (*Smart Data*). Для обеспечения внутренней логистики умными данными специализированная фирма *Dr. Thomas + Partner* (Германия), много работающая в области цифровизации логистики, создала систему *Activitys* и на ее основе программное обеспечение *Events*, которое должно встраиваться в автоматизированные системы управления складом (*WMS*). Это программное обеспечение относят к т.н. программам *Manufaktur – Software* [3].

Новое направление в развитии внутренней логистики связано с применением мобильных устройств (смартфонов, айфонов, планшетов и др.). Специализированная в области логистики фирма *Klinkhammer GmbH* (Германия) разработала и предлагает программное приложение для смартфонов, что позволяет использовать их вместо специальных переносных терминалов с использованием беспроводной связи *Bluetooth*. С помощью нового приложения реализуется аудиовизуальная автоматизированная система *KlinkVOICE* и логистические технологии *Pick-by-Voice* и *Put-by-Voice* для складирования грузов и отбора грузов по заказам.

Как уже отмечено выше, в складской логистике широкое применение получили различные мобильные ИТ-устройства (гаджеты), работающие с операционными системами Windows Embedded Handheld и Windows CE. Между тем используемые операционные системы имеют определенный срок службы. Например, с января 2020 г. прекращается поддержка системы Windows Embedded Handheld, версия 6.5. На смену уверенно приходит операционная система Android. С учетом такого тренда компания Honeywell совместно с Google и Qualcomm разработала платформу Mobility Edge для управления мобильными ИТ-устройствами (смартфоны, айфоны и др.), которая гарантировано обеспечит работу операционной системы Android 10 до 2025 г. Это позволит стабильно функционировать объектам логистики с широким применением мобильных устройств с разными системами.

Интересный пример широкого применения мобильных устройств связан с работой логистической группы Raben Group, которая располагает 65-ю филиалами в 21 стране мира. Для работы по новейшим информационным технологиям и стабильного обеспечения непрерывных информационных потоков все водители транспортных средств обеспечены мобильными терминалами типа Toughbook N1 фирмы Panasonic (Германия). Общее число таких терминалов - 4 тыс. единиц. На всех терминалах установлено программное обеспечение TISLOG и TISMMDM фирмы TIS, партнера Panasonic. Терминал Toughbook N1 соединяет в себе функциональные возможности планшета, мобильного телефона и устройства для считывания штрихового кода, для удобства пользователя терминалы снабжены дисплеем размерами по диагонали 120 мм. В терминалы встроен модуль GPS - глобальной системы определения местоположения транспортных средств на основе спутниковой связи. Работа всего парка транспортных средств на основе единого технического и программного обеспечения позволяет оперативно управлять и контролировать весь производственный процесс в реальном времени [4].

Широкое применение в логистике получили различные системы телематики и автоматизированного управления складами, парками автотранспортных средств, погрузочно-разгрузочными работами и др., например, системы LiDAT, VisionLink и др. Однако такие системы имеют специализированный характер и не могут быть использованы фирмами с разнообразным парком технических средств и характером работ. Фирма Carl Beuthhauser (Германия) разработала и предлагает единую электронную платформу модульного типа OneStop Pro, построенную на использовании облачной компьютеризации (Cloud) и работающую по принципу All-in-One ("Все в одной"). Модульный принцип построения платформы в сочетании с системой визуализации позволяет реализовать различные функции оперативного управления, контроля технического состояния оборудования, проведения работ по техническому содержанию и ремонту, финансовых расчетов за услуги, анализа показателей, данных и функций для всего парка транспортных средств, дорожных и строительных машин, перегрузочных кранов, пунктов производства погрузочно-разгрузочных работ и др. При этом для обмена данными возможно использование мобильных терминалов разного типа, смартфонов, айфонов, планшетов и др.

Отдельного внимания требует рассмотрение радиочастотной технологии идентификации (RFID), на основе которой реализуются многие современные процессы автоматизации и цифровизации логистики. В радиочастотной технологии носителем информации является так называемый транспондер. Встраивание транспондера в поддон или в другой носитель груза позволяет решать целый ряд задач автоматизации, управления и контроля логистических и транспортных процессов. Различают три вида транспондеров: активные, пассивные и полупассивные (Semi-aktive). Активные транспондеры снабжены собственным источником питания и могут дистанционно передавать необходимую информацию о состоянии и положении груза. Пассивные транспондеры активизируются с помощью электромагнитного излучения от считывающего устройства. Полуактивные транспондеры становятся активными только, если в них дополнительно встроить аккумулятор. Выбор типа транспондера определяется характером задач, которые требуют решения на основе технологии RFID [5].

Система RFID значительно превосходит систему штрихового кодирования по ряду своих качеств и особенностей. Система многофункциональна, очень гибкая, дистанционно воспринимает информацию. Дальность действия системы определяется диапазоном, в котором работает система. В диапазоне на гигагерцотах дальность считывания - до 30 м. Системы безопасности работы вилочных погрузчиков, построенные на основе RFID и работающие в реальном времени, "видят" сквозь препятствие, например, стоящего за поддонами в два яруса человека. Универсальные считывающие устройства воспринимают информацию одновременно с нескольких транспондеров, что повышает гибкость и производительность системы [6].

В рамках общей концепции автоматизации промышленного производства и внутренней логистики концерн Siemens AG (Германия) завершил свое портфолио Simatic-RF600 созданием так называемой самоклеящейся этикетки On-Metall-Label Simatic RF6421, работающей на ультравысоких частотах (UHF). Этикетка с большим объемом памяти может прикрепляться непосредственно к металлическим деталям. Главное достоинство новой этикетки состоит в том, что информация может считываться дистанционно с расстояния до 2,8 м. Температура среды при этом может быть от -20°C до +85°C.

Для автоматизации погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ важно получать в реальном времени информацию о размерах грузов. Для решения этой задачи Университет г. Магдебурга (Германия) совместно с фирмами Thoris Technologies GmbH и Viaboxx GmbH (все - Германия) в рамках научно-исследовательского проекта создали компактную сенсорную систему Multisensor с использованием технологии объемного сканирования (3D). Система в считанные секунды передает данные о размерах и форме грузов в цифровом формате.

В Институте интегрированного производства (IPN, Ганновер, Германия) с участием др. институтов и фирм-соисполнителей в рамках научного проекта Visier разрабатывается новая система обеспечения безопасности производства работ вилочными погрузчиками и др. наземными транспортными средствами на основе использования водителями специальных очков расширенной реальности (Augmented Reality, AR). Примене-

ние специальных очков (AR-Brille) в сочетании с камерами видеонаблюдения и на основе специального программного обеспечения создает для водителя условия для значительно лучшей видимости и контроля ситуации в направлениях движения вперед и назад. Первое тестирование дало положительные результаты [7].

В последние годы в складской и производственной логистике все более широкое применение получает напольный транспорт в виде напольных тележек, работающих без водителей (FTF) и систем на их основе (FTS). Этому способствует создание современных навигационных систем на основе лазерной технологии и различных сенсоров. Собственно тележки стали оборудовать грузоподъемными и транспортными устройствами автоматического действия, что позволило автоматизировать не только управление движением, но и весь процесс от погрузки и до разгрузки в пункте назначения. Значительное развитие получило проектирование таких систем.

Так, например, фирма Dualis GmbH совместно с партнерской фирмой Faurecia Autositze GmbH (обе - Германия) разработала новую систему моделирования 3D и оптимизации материальных потоков с транспортными системами с напольными тележками без водителей (FTS, AGV). Для реализации разработанной системы создана библиотека компонентов, которая позволяет быстро и эффективно моделировать потоки и системы для их оптимизации. На основе новой системы можно запрограммировать и оптимизировать, например, монтажную линию с тележками без водителей (FTF) без дополнительного программирования [8].

Интересен опыт фирмы Engel Austria GmbH (Австрия) с годовым оборотом 1,6 млрд евро, которая специализируется в области производства машин для литья под давлением, а также оказания различных услуг в области автоматизации производства. Транспортное обеспечение производственного процесса на промышленном предприятии фирмы выполняет транспортная система с напольными транспортными средствами, работающими без водителей (FTS). В системе работают транспортные средства двух типов: вилочные высокоподъемные тележки типа Amadeus грузоподъемностью 1,5 т и небольшие тележки типа Sally для доставки инструментов и др. мелких грузов. Весь парк транспортных средств - поставки фирмы DS Automation (также Австрия). Управление транспортной системой осуществляется через программное обеспечение DS Navios.

Технологии навигации напольных транспортных средств, работающих без водителей (FTS, FTF), постоянно развиваются. Фирма Sick AG (Германия) предложила новую технологию, построенную на основе использования принципа люминесценции. Маршрут движения транспортных средств обозначается приклеиванием к полу цеха или склада люминесцентной ленты, для считывания которой на тележке устанавливается специальный оптический сенсор типа OLS20. Ширина поля "зрения" сенсора 180 мм, что позволяет устраивать развилки на два направления или слияние трассы из двух составляющих, а также возможность прокладки кривых радиусом 0,5 м и более. Возможны и другие модификации оптического сенсора, например OLS10, с дополнительным дисплеем и интерфейсом TCP/IP, Ethernet и др.

Фирма MLR System GmbH (Германия) известна как поставщик совершенных систем напольного транспорта

с тележками, работающими без водителей (FTS). С целью дальнейшего развития и совершенствования управления этими системами фирма разработала на основе системы LogoS специальное приложение, которое реализуется на смартфонах, планшетах или наручных "умных часах". Приложение информирует о возникших препятствиях в работе системы FTS, остановке транспортного средства и др. нарушениях нормальной работы системы FTS. Сигнал подается путем вибрации.

Фирма Bosch Rexroth GmbH (Германия) предлагает для внутренней логистики транспортные системы Active Shuttle на основе напольных тележек-роллеров грузоподъемностью 260 кг, работающих без водителей. Безопасность движения тележек обеспечивает система управления в сочетании с лазерным сканированием среды. Тележки работают по принципу Plug & go. Впервые были представлены на выставке логистики LogiMAT 2019.

В последнее время во внутренней логистике и на внутрицеховом транспорте получает все большее распространение тележечный транспорт в виде поездов с тягачом, оборудованным электрическим приводом, с прицепными тележками, оборудованными различными техническими средствами для погрузочно-разгрузочных работ с разной степенью автоматизации. Используемые для движения таких поездов средства и системы навигации и обеспечения безопасности движения ориентированы на работу внутри помещений складов, промышленных предприятий и др. Определенный прорыв в этой области принадлежит фирме Neumaier Industrie GmbH & Co. KG (Германия), которая разработала и реализовала на практике систему навигации и безопасности, обеспечивающую возможность работы поездов типа Factory Train FT600 вне помещений. При этой системе тягач и все прицепные тележки оборудуют сканирующими устройствами, которые просматривают пространство по направлению движения и с обеих сторон поезда. В случае появления в зоне опасности человека система управления не только подает сигналы опасности, но и принудительно может остановить поезд. Важная особенность системы состоит в том, что система обеспечивает безопасность при движении в кривых участках. Эксплуатация поездов как в помещениях, так и вне помещений возможна в полуавтоматическом или автоматическом режимах. Тележки могут быть оборудованы цепными конвейерами, телескопическими вилочными захватами или другими техническими устройствами для автоматизации производства работ. В качестве сканирующего устройства безопасности наиболее целесообразно использовать сканер типа OutdoorScan3 фирмы Sick AG (Германия) [9].

Роботизация в логистике, промышленном и сборочном производстве получает все более широкое применение. Особенно широкое применение роботизация используется в тарно-упаковочном производстве и при комплектовании заказов на складах. Рассмотрим это на ряде примеров.

Действующее в Германии квотирование тары многоразового использования в сочетании с фирменной индивидуализацией тары для пива и прохладительных напитков предъявляют дополнительные требования к складской логистике. Сортировка и пакетирование порожней тары многоразового использования других производителей связана со значительным объемом работ и привлечения для их выполнения дополнительного

персонала. Широко известная в Германии фирма-поставщик пива Paderborner Brauerei с привлечением специализированной фирмы Vision-Tec решила эту задачу на основе роботизации. На складе на специально созданных станциях сортировки порожней тары в центре станции установлен шарнирно-рычажный промышленный робот, который сортирует порожнюю тару на семь видов и укладывает бутылки в порожние ящики. Число назначений определяется числом фирм, с которыми производится обмен порожней тарой. Производительность такого робота составляет 1000 ящиков/ч. С помощью транспортной системы с напольными тележками без водителей (FTS) с бортовыми литий-ионовыми аккумуляторами ящики передаются в зону пакетирования и упаковки грузовых единиц, где работают роботы типа Motoman MPL500 11 с четырьмя степенями свободы грузоподъемностью 500 кг с рабочей зоной 3024 мм по горизонтали и 3159 мм по вертикали. Управление роботами реализуется устройством Motoman DX 200 с контроллером безопасности 3 категории. Роботизация всех операций по комплектованию порожней тары полностью подтвердила свою эффективность и позволила значительно сократить численность персонала.

На международной выставке FachPack 2019 фирма goTeg впервые представила в качестве инновации пакетирующий робот типа PaGo, оборудованный многофункциональным захватывающим устройством. Грейферный захват в сочетании с вакуумным обеспечивают возможность пакетирования в разнообразной таре (коробки из картона, ящики и др.), с прокладками из картона и без прокладок между рядами. Кроме того фирма представила специальный грейферный захват для грузов в мешках.

На этой же международной выставке фирма Transnova-Ruf экспонировала роботизированную систему для упаковки сыра в коробки из картона, пакетирования и формирования грузовых единиц на поддонах. Основные технологические операции выполняет промышленный робот с шестью степенями свободы, оборудованный многофункциональным захватным устройством. Робот отвечает требованиям колаборативных роботов, что позволяет работать совместно с человеком. Система работает со встроенным магазином. Коробки с продукцией передаются следующему роботу для пакетирования и укладки на поддоны. Готовая продукция из системы поступает на отводящее транспортное устройство в виде грузовых единиц на поддонах [11].

Роботизация производства и логистики с использованием колаборативных роботов (Cobot), которые могут работать совместно с человеком, требует дальнейшего расширения сферы действия таких роботов. Определенных успехов в этой области добилась фирма SKF Motion Technologies на основе применения специальных акторов и подъемных устройств. Предлагаемые фирмой коботы могут линейно перемещаться на 1800 мм с возможностью подъема грузов на высоту до 900 мм, а, при необходимости, и на большую высоту. Предлагаемые фирмой роботы могут работать по принципу "Бери и пользуйся".

Еще один пример успешной роботизации Компания Kawasaki Robotics с участием фирмы dmp Sondermaschinenbau успешно работает в области автоматизации и роботизации логистики и упаковочного производства. Компания выпускает роботы типа

Sanosan, оснащенные двухмерными видеокамерами. Робот типа RS007L распознает и захватывает грузы по принципу "Бери по площади" (Pick & Place) и подает их на специальный конвейер. По конвейеру упаковки передаются в зону быстродействующего робота RS005L, который комплектует предметы в магазине для упаковки. Еще один робот типа RS007L закрывает и этикеткирует картонные коробки одноразового использования или в др. тару многократного использования. На заключительных этапах робот типа RS020N пакетирует грузы в тару на поддоны, после чего грузовые единицы автоматически упаковываются и этикеткируются [12].

#### Выводы:

1. Цифровизация и автоматизация, облачная компьютеризация и большие данные определяют генеральное направление развития логистики за рубежом.
2. Все более широкое применение получают мобильные устройства: смартфоны, айфоны, планшеты и др.
3. Создаются электронные платформы и новые системы управления, разрабатываются новые программные средства на основе оригинальных алгоритмов.
4. На новой технической основе широко внедряются транспортные системы с напольными тележками без водителей, оборудованные автоматическими устройствами для погрузочно-разгрузочных работ.
5. Определенные успехи достигнуты в роботизации складской логистики, в частности, упаковочного производства.

#### Литература

1. Logistik – Treiber der digitalen Veränderung //DHF Intralogistik. [Электронный ресурс].-2019, № 11.-С.10-11.
2. Mehrwert durch Innovationen/Giovanni Prestifilippo //Techn. Logist.-2019, Прил. Neubaufibel 2020.-С. 8-11.
3. Smart Data und die Intralogistik //Techn. Logist.-2019.-59, № 11-12.-С.28-29.
4. Handhelds für die ganze Flotte //DHF Intralogistik. [Электронный ресурс].-2019, № 11.-С. 23.
5. Intelligente Paletten //DHF Intralogistik. [Электронный ресурс].-2019, № 11.- С. 16-17.
6. Nachferfolgung in Echtzeit //Techn. Logist.-2019.-59, № 11-12.-С.40.
7. Mehr Durchblick für Staplerfahrer //Ind.-Anz.-2019.-141, № 33-34.-С. 42-43.
8. AGV-basierte Prozesse per 3D-Simulation optimiert planen //Maschinenmarkt.-2019.-125, № 125.-С. S16.
9. Stets sicher unterwegs sein //F+H: Fördern und Heben.-2019.-69, № 11.-С. 24-25.
10. Roboterbasiertes Leerhandling //DHF Intralogistik.- [Электронный ресурс].-2019, № 10.-С.52-53.
11. Pallettieren mit innovativen Greifern //Verpack.-Rdsch.-2019.-70, № 9.-С. 30.
12. Intelligent automatisiert//Verpack.-Rdsch.-2019.-70, № 9.-С. 55.

#### Сведения об авторе:

**Тиверовский Владимир Изекильевич**, старший научный сотрудник в Отдела научной информации по транспорту ВИНТИ РАН.

Адрес: 125190 Москва, ул. Усиевича, 20. ВИНТИ РАН.

Телефон 499-152-56-33.

E-Mail Logistic@viniti.ru.

**МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ПО ПРОГРАММЕ ВЫХОДА В ПУТЕВУЮ ТОЧКУ**Кандидат техн. наук **Жук А.С.**

(Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова)

**SHIP MOTION MODEL BASED ON THE PROGRAM OF WAYPOINT FOLLOWING****A.S. Zhuk, Ph.D. (Tech.)**

(Admiral Ushakov Maritime State University)

*Управление судном, программа движения, модель движения судна.**Ship handling, motion program, ship motion model.*

*Рассматривается задача выхода неустойчивого на курсе судна в заданную путевую точку. Используется нелинейная модель поступательно-вращательного движения судна. Программа движения задана последовательным переключением путевых точек маршрута при достижении судном заданной дистанции. Режим работы главного двигателя не изменяется, на допустимый угол перекладки руля наложены ограничения. Автоматическое управление выполняется ПИД-регулятором. Выполняется моделирование, даются рекомендации для практического применения. Выполненные исследования способствуют совершенствованию методов управления судном.*

*The article has considered the motion of heading unsteadiness vessel to the specified waypoint. Nonlinear model of forward-rotational motion of the vessel is used. Motion program is defined by sequential switching of route's waypoints when defined distance is reached. Main engine mode of operation is steady, permissible rudder angle is limited. Automatic control is performed by PID controller. Modeling has been carried out, recommendations for practical use have been given. Performed researches contribute to the improvement of the ship's handling methods.*

**Введение**

Развитие технических средств судовождения, в особенности, электронной картографии, требует совершенствования методов планирования маршрута и программирования движения судна по маршруту [1, 2]. Система автоматического управления должна обеспечивать движение судна по заданной программе, датчики навигационной информации в интегрированных системах ходового мостика обеспечивают судоводителю функции контроля выполнения задачи движения.

На практике современные электронные навигационные системы в настоящее время ограничены в методах планирования маршрута. План перехода формируется последовательным вводом путевых точек, которые при необходимости сопрягаются дугами окружностей.

Для создания эффективной системы управления необходимо сформировать программу движения, которая минимизирует определенный параметр, например, пройденное расстояние или время движения [3 - 8].

В настоящей работе решается задача движения судна по маршруту, заданному последовательностью путевых точек. Задача не включает сопряжение участков маршрута. Кусочно-линейная траектория задана прямыми, соединяющими соседние путевые точки. Задача движения выполнима только при кинематической и динамической совместимости судна с программой движения [7, 9]. Например, маневр судна ограничен минимальным радиусом циркуляции. Предполагается, что заданная программная траектория кинематически и динамически выполнима.

Задаче движения судна по маршруту может соответствовать много формулировок цели управления. Под целью управления движением судна понимается указание тех свойств, которыми движение судна должно об-

ладать для того, чтобы задача управления судном была выполнена [9].

Поставленная задача управления судном будет решена, если система динамически достаточна и управляемое движение судна обладает одним из следующих свойств:

- вектор скорости судна проходит через очередную путевую точку (минимизация отклонения курса судна от пеленга на путевую точку);
- судно движется по линии, соединяющей соседние путевые точки (минимизация бокового отклонения судна от траектории).

В качестве цели управления принимается первая из приведенных выше формулировок.

Программой движения судна являются уравнения, которые определяют цель движения судна. Программа обладает тем свойством, что если ее уравнения во время движения удовлетворяются, то задача движения решается [9].

Для реализации выбранного метода программирования движения судна необходимо знать только координаты путевых точек. Система управления должна удерживать курс судна равным пеленгу на путевую точку, т.е. должна минимизировать параметр

$$\psi = K - П; \quad \psi \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $K$  – курс судна;  $П$  – пеленг на путевую точку.

В момент, когда судно сблизится с путевой точкой на заданное расстояние, система управления переключает программу движения в следующую путевую точку.

Программу выхода судна в путевую точку относительно просто реализовать. Если дистанция между соседними путевыми точками достаточно большая, то система управления будет работать надёжно. Однако,



если требуется двигаться точно по заданной траектории или выйти в заданную точку с определенным курсом, тогда этот метод может оказаться неэффективным.

### Постановка задачи

Задача движения судна в путевую точку часто встречается в практике судовождения. После маневра расхождения с другим судном или обхода навигационной опасности в условиях открытого моря целесообразно не возвращаться на линию заданного пути, а следовать в очередную путевую точку. В условиях достаточного водного пространства для маневрирования повороты согласно плана перехода так же выполняются изменением курса в следующую путевую точку при сближении с очередной путевой точкой на заданное расстояние.

Для целей моделирования используется прямоугольная система координат  $XY$ , ось  $X$  направлена по меридиану на север, ось  $Y$  – по параллели на восток, единицы отсчета – морские мили. Начальная позиция судна находится в нулевой точке с координатами  $O(0; 0)$ , начальная скорость судна 10 узлов, начальный курс  $0^\circ$ , угловая скорость и ускорение отсутствуют. План перехода задается последовательностью путевых точек с координатами  $WP1(3; 4)$ ,  $WP2(8; -2)$ ,  $WP3(2; -3)$ . Задача управления состоит в движении по маршруту. Заданный курс равен пеленгу на очередную путевую точку, изменение курса происходит при сближении с путевой точкой на заданное расстояние, для путевой точки  $WP1$  заданное расстояние равно 1 морской миле, для путевой точки  $WP2$  – 0.5 морских миль. Управление выполняется только рулем, на угол перекладки руля наложены ограничения, предельный угол перекладки руля равен  $10^\circ$  в сторону каждого борта. Главный двигатель в режиме полного маневренного хода, винт вращается со скоростью 75 оборотов в минуту, режим работы главного двигателя не изменяется.

### Исходные данные

Пеленг  $\Pi$  на заданную путевую точку вычисляется в полукруговом счете по формулам

$$\Pi = \arctg\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right), \text{ при } X_{WP} > X_C \text{ и } (Y_{WP} > Y_C \text{ или } Y_{WP} < Y_C); \quad (2)$$

$$\Pi = \arctg\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right) - 180, \text{ при } X_{WP} < X_C \text{ и } Y_{WP} < Y_C; \quad (3)$$

$$\Pi = \arctg\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right) + 180, \text{ при } X_{WP} < X_C \text{ и } Y_{WP} > Y_C; \quad (4)$$

$$\Pi = 90, \text{ при } X_{WP} = X_C \text{ и } Y_{WP} > Y_C; \quad (5)$$

$$\Pi = -90, \text{ при } X_{WP} = X_C \text{ и } Y_{WP} < Y_C; \quad (6)$$

$$\Delta X = X_{WP} - X_C; \Delta Y = Y_{WP} - Y_C, \quad (7)$$

где  $X_{WP}; Y_{WP}, X_C; Y_C$  – координаты путевой точки и координаты судна, соответственно.

Дистанция  $D$  до путевой точки вычисляется по формуле

$$D = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}. \quad (8)$$

Для описания динамики судна используется нелинейная модель поступательно-вращательного движения судна из исследования [10]

$$\begin{cases} \dot{\omega} = a\dot{\omega} + b_1\omega + b_2\omega|\omega| + b_3\omega^3 + (\alpha_1 v + \alpha_2 n e^{-v\alpha_3}) (\delta + e\dot{\delta}) \\ \dot{v} = f\omega^2 + g v^2 + h n, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\omega$  – угловая скорость судна относительно вертикальной оси;  $v$  – поступательная скорость судна;  $\delta$  – угол перекладки руля;  $n$  – частота вращения винта;  $a, b_1, b_2, b_3, e, f, g, h, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – параметры модели.

Значения параметров модели (9), представленные в таблице 1, обеспечивают неустойчивость судна на курсе.

Таблица 1

### Параметры модели судна

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$a$	-0.044	$e$	0.5	$\alpha_1$	0.00000475
$b_1$	0.000278	$f$	-0.1	$\alpha_2$	0.000004167
$b_2$	-0.00278	$g$	-0.0003	$\alpha_3$	0.0654
$b_3$	-0.00556	$h$	0.0004		

Заданы нулевые начальные условия для угловых скоростей и ускорений, координат и курса судна, начальная поступательная скорость судна – 10 узлов.

В условиях открытого моря в общем случае используются только маневры курсом. Частота вращения винта не изменяется.

### Управление по программе выхода в путевую точку

В современных авторулевых наиболее распространенным является ПИД-регулятор. Поэтому для целей моделирования автоматическое управление выполняет ПИД-регулятор с передаточной функцией

$$\delta_{PID}(s) = P + I\left(\frac{1}{s}\right) + D\left(\frac{Ns}{s+N}\right), \quad (10)$$

где  $P, I, D$  – независимые коэффициенты пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего звеньев, соответственно;  $N$  – коэффициент фильтра.

Таблица 2

### Параметры регулятора

Параметр	Значение
$P$	1
$I$	0.0001
$D$	50
$N$	1.5

На управляющее воздействие наложены ограничения

$$|\delta(t)| \leq \delta_{\max}; \quad \delta_{\max} = 10, \quad (11)$$

где  $\delta_{\max}$  – предельно допустимый угол перекладки руля.

Компенсация эффекта насыщения достигается условным интегрированием. Если сигнал управления  $\delta(t)$  достигает предельного значения, интегратор отключается и интегрирование останавливается.

На рис. 1 представлена структурная схема модели движения судна по программе выхода в путевую точку в элементах среды Simulink.

Входными сигналами блока редактора дифференциальных уравнений (9) являются управляющие сигналы угла и скорости перекадки руля, а также, постоянный

сигнал частоты оборотов винта. На выходе получаются сигналы поступательной и угловой скоростей судна, которые преобразуются по известным формулам кинематики

$$X_c(t) = \int v(t) \cos K(t) dt; Y_c(t) = \int v(t) \sin K(t) dt;$$

$$K(t) = \int \omega(t) dt,$$
(12)

где  $K$  – курс судна,  $t$  – время.

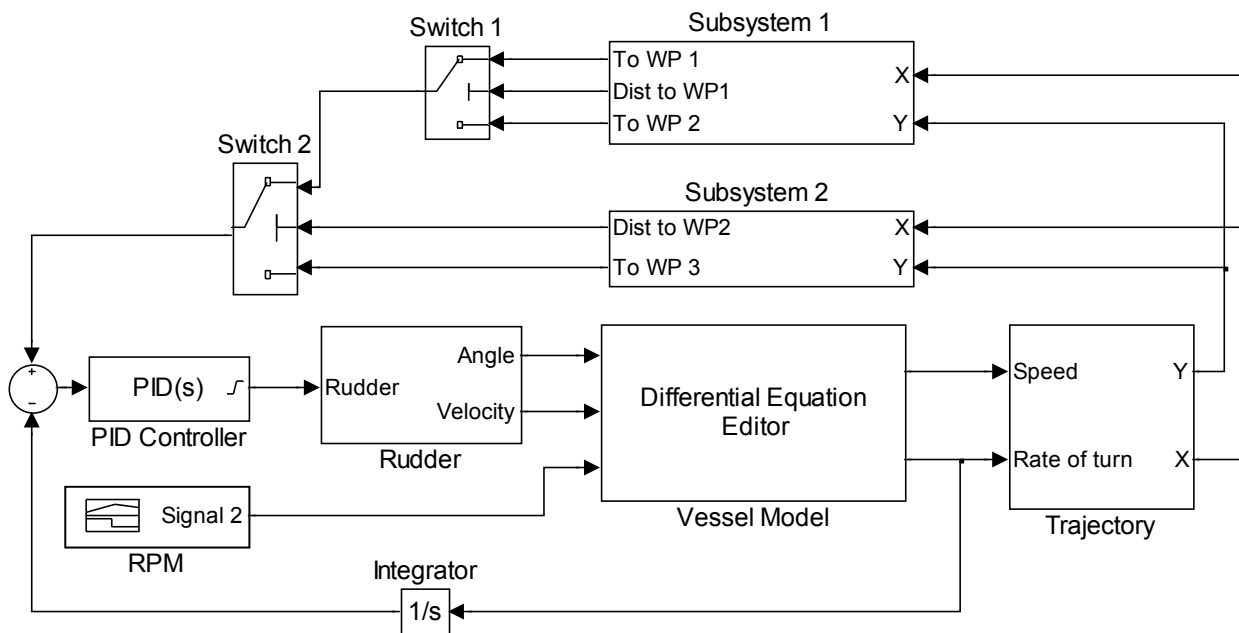


Рис. 1. Структурная схема модели движения судна

В результате получаются сигналы координат судна, которые формируют траекторию движения судна. Координаты являются входными сигналами блоков вычисления программных значений пеленга на путевую точку и дистанции до путевой точки. Пеленг на путевую точку и курс судна подаются на блок сравнения сигналов, и их разность поступает на вход регулятора. Переключение между заданными путевыми точками выполняют блоки переключателей, в которых пороговыми параметрами переключения являются заданные дистанции до путевых точек.

### Результаты моделирования

На рис. 2 представлены план перехода, состоящий из трех отрезков маршрута, и траектория движения судна по программе выхода в путевую точку. На рис. 3 представлены угол перекадки руля, курс, угловая и поступательная скорости судна. На рис. 4 представлено сравнение сигналов курса судна и пеленга на путевую точку.

В начальный момент времени значения курса судна и пеленга на путевую точку WP1 не совпадают, регулятор перекачивает руль на заданный предельный угол, компенсируя отклонение заданного курса от текущего. В виду неустойчивости судна на курсе угловую скорость необходимо погасить перекадкой руля на противоположный борт. Регулятор одерживает судно и стабилизирует на курсе. Последующие два поворота выполняются аналогичным образом. Так как изменения курса в этих случаях значительно больше, угловая скорость успевает стабилизироваться на установившемся значении, соответствующем постоянному углу пере-

кадки руля. Процесс одерживания и стабилизации аналогичен первому повороту.

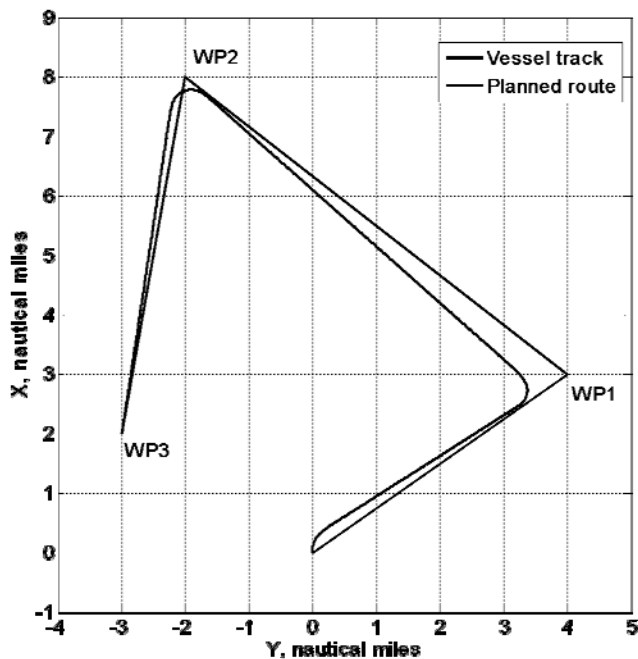


Рис. 2. Траектория движения судна

Момент переключения на вторую путевую точку WP2 соответствует дистанции равной одной морской миле до точки WP1, судно выполняет поворот заранее. Момент переключения на третью путевую точку WP3

соответствует дистанции равной половине морской мили до точки WP2, поэтому судно, выполняя поворот, успевает пересечь линию заданного пути на третьем участке маршрута, а затем стабилизируется справа от линии заданного пути.

Поступательная скорость падает во время выполнения поворотов. Величина падения скорости зависит от активности маневра. На прямолинейных участках поступательная скорость судна возрастает, достигая уста-

новившегося значения, соответствующего заданной постоянной частоте оборотов винта.

Следует отметить, что при уменьшении дистанции до путевой точки незначительные изменения координат судна вызовут большие изменения пеленга на заданную точку, что приведет к возникновению скачков сигнала на входе регулятора. Поэтому для надежной работы системы управления, метод должен обеспечить достаточную дистанцию между судном и заданной путевой точкой.

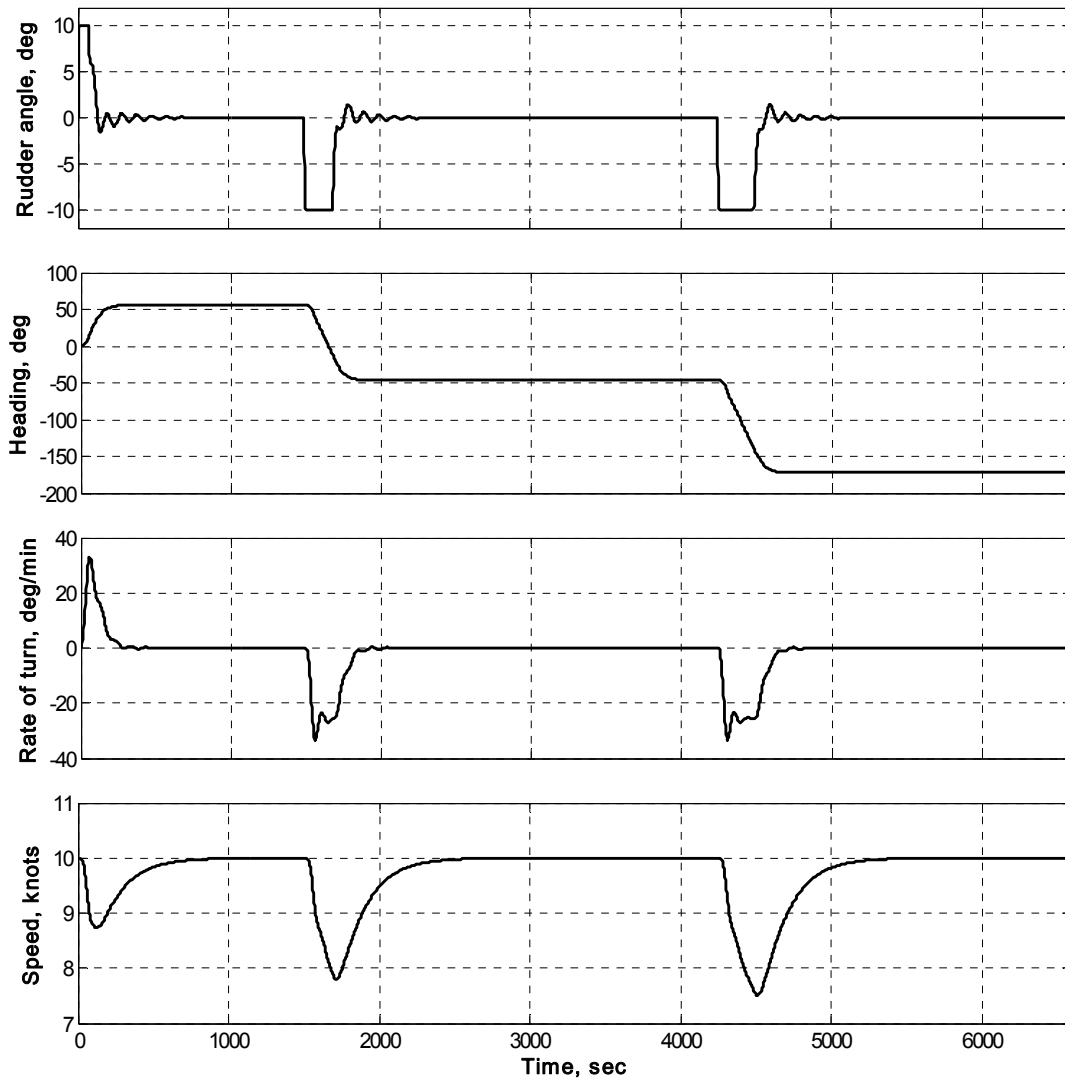


Рис. 3. Угол перекадки руля, курс, угловая и поступательная скорости судна

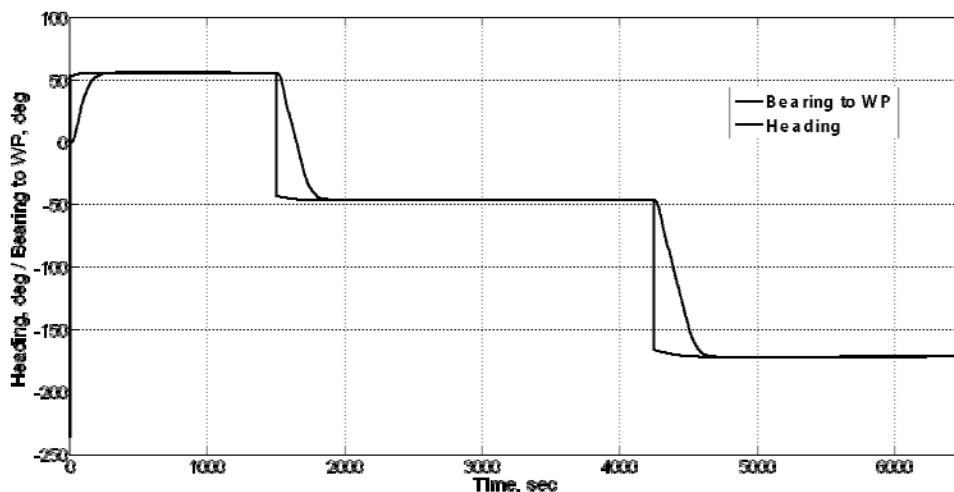


Рис. 4. Пеленг на путевую точку и курс судна

## Заключение

Задача выхода в путевую точку очень часто встречается в практике судовождения, когда после отклонения от линии заданного пути необходимо вернуться к следованию по маршруту, в условиях достаточного водного пространства целесообразно следовать в следующую путевую точку. Судоводитель решает эту задачу устанавливая заданный курс равный пеленгу на путевую точку. Эти действия можно передать системе управления, оставив судоводителю функции контроля.

В результате выполненных исследований сформирована программа выхода судна в заданную путевую точку. Получены управляющие воздействия, реализующие автоматическое управление по программе ПИД-регулятором. Исследованы кинематические характеристики движения судна. На основе полученных результатов можно сделать вывод о возможности реализации предложенного метода в современных системах управления судном.

## Литература

1. Жук А.С. Программирование движения судна на основе уравнений кривых второго порядка / А.С. Жук // Эксплуатация морского транспорта. – 2011. – № 2 (64). – С. 25 – 29.
2. Жук А.С. Формирование программных траекторий судна на основе составных сплайнов Эрмита / А.С. Жук // Эксплуатация морского транспорта. – 2013. – № 1 (71). – С. 26 – 31.
3. Agrachev A.A. Nonlinear and optimal control theory / A.A. Agrachev, A. S. Morse, E.D. Sontag, H.J. Sussmann, V.I. Utkin. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 347 p.

4. Chernousko F.L. Control of Nonlinear Dynamical Systems / F.L. Chernousko, I.M. Ananievski, S.A. Reshmin. - Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2008 – 396 p.

5. La Valle S.M. Planning Algorithms / S.M. La Valle. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 929 p.

6. Levine J. Analysis and control of nonlinear systems. A flatness-based approach / Levine J. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 319 p.

7. Shima T. UAV Cooperative Decision and Control / T. Shima, S. Rasmussen. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009 – 164 p.

8. Smith A.C. Automated continuous process control / A.C. Smith. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 216 p.

9. Коренев, Г.В. Цель и приспособляемость движения / Г.В. Коренев. – М.: Наука, 1974. – 528 с.

10. Бурьлин Я.В. Идентификация нелинейной модели движения судна и адаптивное управление по траектории: дис. ... канд. техн. наук; специальность: 05.22.19 – Эксплуатация водного транспорта, судовождение / Я.В. Бурьлин. – Новороссийск: Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, 2018. – 132 с.

## Сведения об авторе:

**Жук Александр Сергеевич** – доцент кафедры «Судовождение», ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», 353918, Россия, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93.  
Телефон +7 905 471 80 20, +7 938 540 57 23.  
E-Mail zhuk@nightmail.ru, alszhuk@yandex.ru.

**ПЕРСПЕКТИВЫ СОТРУДНИЧЕСТВА ВОСТОЧНОСИБИРСКИХ РЕГИОНОВ РОССИИ И  
СТРАН АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКОГО РЕГИОНА  
В СФЕРЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ И ГАЗА<sup>1</sup>**

Доктор эконом. наук, профессор **Филимонова И.В.**,  
кандидат эконом. наук **Немов В.Ю.**,  
кандидат эконом. наук **Проворная И.В.**,  
**Дзюба Ю.А.**

(Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. Трофимука СО РАН)

**PROSPECTS FOR COOPERATION OF EAST SIBERIAN REGIONS OF RUSSIA AND  
COUNTRIES OF ASIAN-PACIFIC REGION  
IN OIL AND GAS TRANSPORT<sup>1</sup>**

**I.V. Filimonova**, Doctor (Econ.), Professor,  
**V.Yu. Nemov**, Ph.D. (Econ.),  
**I.V. Provornaya**, Ph.D. (Econ.),  
**Yu.A. Dzyuba**

(Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS)

*Энергетическое сотрудничество, трубопроводы, транспортировка нефти на экспорт, Азиатско-Тихоокеанский регион, топливно-энергетический баланс, потребление энергоносителей, Восточная Сибирь, Дальний Восток.*

*Energy cooperation, pipeline, oil transportation for export, Asia-Pacific region, fuel and energy balance, energy consumption, East Siberia, the Far East.*

*Рассмотрена роль Азиатско-Тихоокеанского региона в поставках нефти и газа на экспорт из России. Авторами проанализирована доля объёма транспортировки углеводородов в совокупном производстве энергоносителей в России, а также динамика изменения стоимостной структуры экспортируемых товаров из России. Выполнен анализ экспортного потенциала восточных регионов России и транспортной структуры экспортного назначения. Авторами также изучена структура потребления и производства энергоносителей, отдельно рассмотрены рынок нефти и газа. Дана характеристика трубопроводного транспорта на востоке страны. Особое внимание посвящено рассмотрению перспектив сотрудничества с АТР в энергетической сфере.*

*The paper considers the role of the Asia-Pacific region in the supply of oil and gas for export from Russia. The authors analyzed the share of hydrocarbon transportation in total energy production in Russia, as well as the dynamics of changes in the cost structure of exported goods from Russia. The analysis of the export potential of the eastern regions of Russia and the transport structure of export destination. The authors also studied the structure of consumption and production of energy carriers, separately examined the oil and gas market. The characteristic of pipeline transport in the east of the country is given. Particular attention is devoted to considering the prospects for cooperation with the Asia-Pacific region in the energy sector.*

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 17-78-20218 «Пространственная специализация и целостное развитие регионов ресурсного типа».

<sup>1</sup> Research was financially supported by Russian National Foundation under Grant № 17-78-20218 «Spatial specialization and holistic development of resource-type regions».

## Введение

В соответствии с Доктриной энергетической безопасности РФ, утверждённой Указом Президента РФ от 13 мая 2019 г. № 216, одним из главных внешнеэкономических вызовов для энергетической безопасности страны и отечественного нефтегазового комплекса названо перемещение центра мирового экономического роста в Азиатско-Тихоокеанский регион (АТР).

В последние годы происходит расширение торговых и экономических связей России со странами АТР, прежде всего обусловленное изменением отношений с европейскими и североамериканскими странами вследствие введения ими в 2014 г. финансовых и секторальных санкций. Однако предпосылки расширения кооперации с Азиатско-Тихоокеанским регионом сложились значительно раньше [3, 4]. Долгие годы основной позицией в товарообороте выступали металлы, но с момента запуска в 2008 г. магистрального нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» и строительства специального морского нефтепорта Козьмино стало нефтяное сырье. Новую эру сотруд-

ничества в конце 2019 г. открыло начало поставок природного газа по газопроводу «Сила Сибири».

Рост сотрудничества в энергетической сфере обуславливает необходимость комплексного исследования динамики развития Азиатско-Тихоокеанского рынка углеводородов и изменения его роли в структуре мирового топливно-энергетического баланса. Рост поставок сырья на азиатские рынки позволит решить не менее важную стратегическую задачу, обозначенную в Доктрине энергетической безопасности РФ – диверсификация поставок и противодействие дискриминации российских организаций, экспортирующих нефть и продукты её переработки на европейском рынке.

## Роль АТР в экспорте из России

Россия располагает самым крупным в мире энергетическим потенциалом. Доля экспорта в общем объеме добычи нефти в России составляет 47 %, экспорт произведенных нефтепродуктов составляет 50 %, благодаря поэтапному вводу в эксплуатацию завода «Ямал СПГ» доля экспортируемого газа выросла с 34 % в 2018 г. до 37 % в 2019 г. (рис.1).

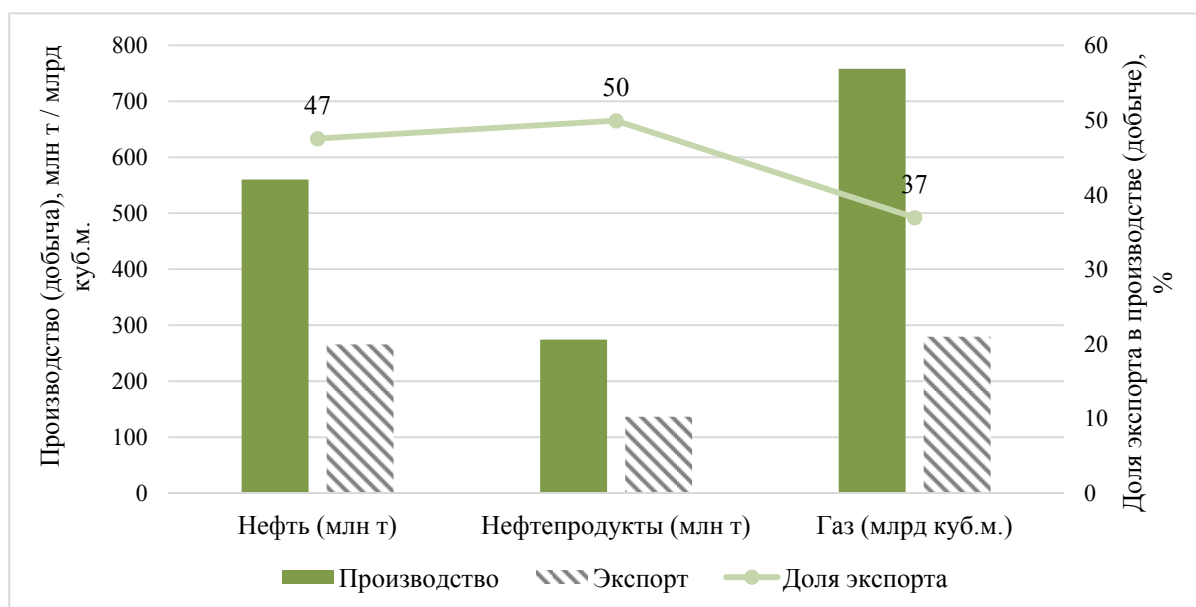


Рис. 1. Доля экспорта в производстве (добыче) энергоносителей в России в 2019 г.

Несмотря на влияние экономических кризисов и мер по диверсификации экономики России, сохраняется высокая зависимость от экспорта энергетических ресурсов [6, 7]. В стоимостной структуре экспорта товаров из России на нефтегазовые ресурсы (нефть, нефтепродукты, газ) приходится 58 %. Поступления от экспортной пошлины долгие годы составляли 30 % доходов федерального бюджета. С началом «налогового манёвра» в 2015 г. и одновременном ухудшении ценовой конъюнктуры на мировых энергетических рынках, доля поступлений от экспорта нефти и газа в бюджет сократилась до 20%.

В дальневосточных регионах России сосредоточена значительная часть энергетических ресурсов, а страны АТР представляют крупнейший мировой центр потребления нефти, нефтепродуктов, а также самый

динамично развивающийся рынок природного и сжиженного газа. В последнее десятилетие в России высокими темпами идет развитие транспортной инфраструктуры на востоке страны, способствующей росту поставок энергетических товаров на рынок стран АТР [5, 11]. Так закончено формирование магистральной нефтепроводной системы «Восточная Сибирь – Тихий океан», развивается газопроводная инфраструктура (2 декабря 2019 г. начаты поставки по газопроводу «Сила Сибири»), расширяются мощности по перевалке грузов в портах, реализуются новые проекты СПГ [1]. В настоящее время на рынок АТР приходится 34 % экспорта нефти, 15 % экспорта нефтепродуктов и 6 % экспорта газа (рис. 4). Крупнейшие торговые партнеры на этом рынке – Китай, Япония и Корея.

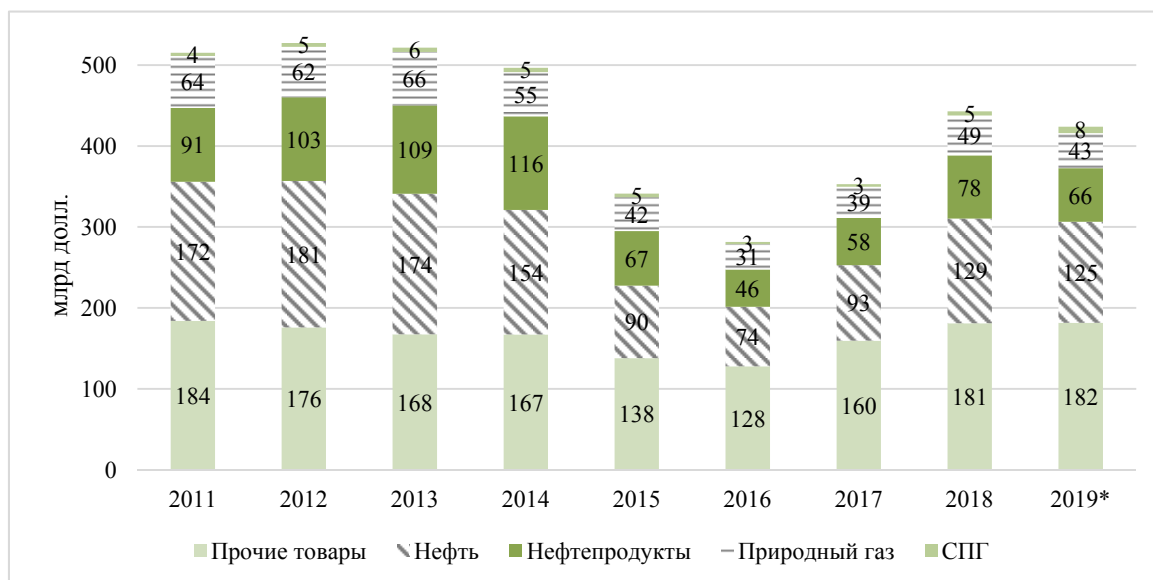


Рис. 2. Динамика стоимостной структуры экспорта товаров из России, млрд долл. (в 2019 г. – оценка по трём кварталам)

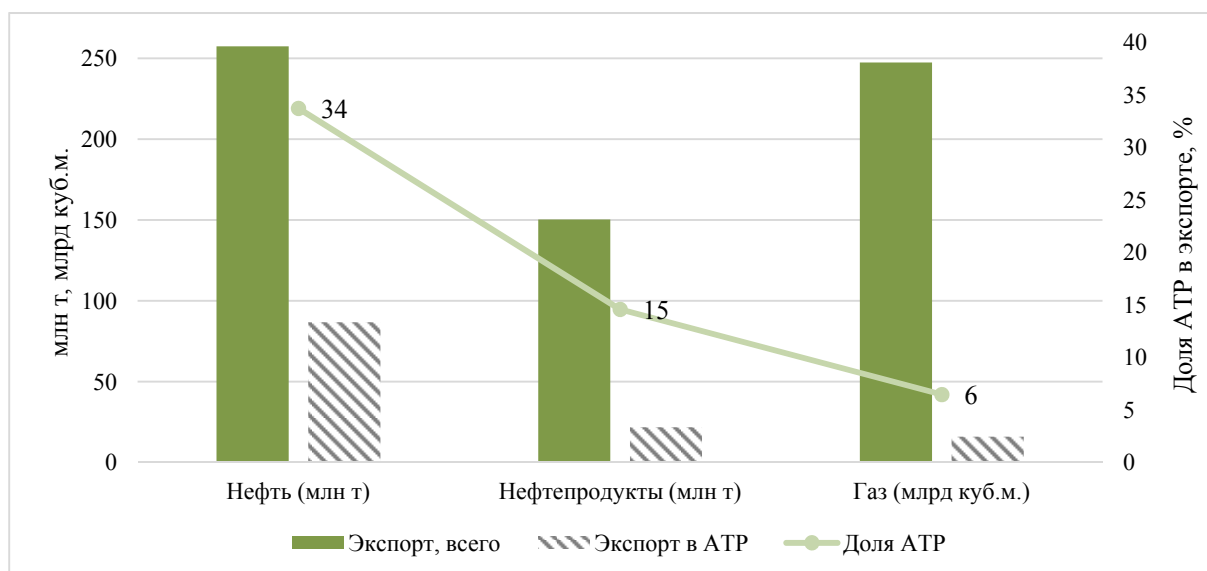


Рис. 3. Роль АТР в экспорте энергоносителей из России в 2018 г.

Долгие годы факторами, сдерживающими сотрудничество России со странами АТР, были неразвитость транспортной инфраструктуры и низкая степень геологической изученности территории Восточной Сибири и Дальнего Востока, а также отсутствие государственных механизмов стимулирования и повышения эффективности деятельности хозяйствующих субъектов в удалённых регионах азиатской части страны. Вместе с тем, начало кооперации в энергетической сфере стимулировало развитие дальневосточных регионов страны, присутствие крупного бизнеса нефтегазового и финансового секторов экономики способствует решению социально-экономических и внешнеэкономических задач.

#### Экспортный потенциал восточных регионов России

В 2019 г. продолжился рост объёма транспортировки нефти на экспорт по магистральному нефтепроводу ВСТО вследствие увеличения мощности отдельных участков трубопроводной системы – ВСТО-1 и ВСТО-2. По итогам 2019 г. объём экспортных поставок нефти по

ВСТО составил 63,2 млн т. Относительно 2016-2017 гг. экспортные поставки выросли на 31 % (табл. 1). Основную часть мощности трубопровода заполняет нефть из месторождений Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия). Добыча последние годы в регионе держится на уровне 55 млн т. Несмотря на то, что месторождения Ванкоро-Сузунской зоны в геологическом плане относятся к Западносибирской нефтегазоносной провинции, по административному делению они расположены в Красноярском крае, поэтому их целесообразно рассматривать в составе восточносибирского региона.

В период 2015-2017 гг. наблюдались задержки со строительством трубопроводной инфраструктуры на территории Китая и в подготовке технических условий к приёму российской нефти на китайских НПЗ. Однако уже в 2018 г. были завершены работы по вводу в эксплуатацию китайского участка нефтепровода «Сковородино-Дацин», а в 2019 г. объём прокачки вышел на проектный уровень – 30 млн т нефти в год.

Таблица 1

### Экспорт нефти из Восточной Сибири и Дальнего Востока

Источник поставки / направление экспорта	2012	2014	2016	2018	2019	2019/ 2018 гг., %
	<b>ВСТО*, всего</b>	<b>31,4</b>	<b>41</b>	<b>48,3</b>	<b>59,6</b>	<b>63,2</b>
<b>Порт Козьмино</b>	<b>16,3</b>	<b>24,9</b>	<b>31,8</b>	<b>31,3</b>	<b>33,2</b>	<b>106,1</b>
Китай	4,1	7,4	22,2	25,5	25,9	101,6
Япония	4,9	8,5	3,9	3,3	2,3	70,4
Южная Корея	1	3	2,4	0,8	2,0	249,0
Прочие	6,4	6	3,3	1,8	3,0	166,0
<b>Нефтепровод-отвод «Скворудино- Дацин»</b>	<b>15,1</b>	<b>16,1</b>	<b>16,5</b>	<b>28,3</b>	<b>30</b>	<b>106,0</b>
Китай	15,1	16,1	16,5	28,3	30	106,0
<b>Миная систему ВСТО</b>	<b>12,6</b>	<b>13,3</b>	<b>16,8</b>	<b>17,2</b>	<b>17,9</b>	<b>104,2</b>
Де-Кастри	7,1	7,9	11,3	11,6	13,0	111,8
Пригородное	5,5	5,4	5,5	5,6	4,9	88,3

\* часть нефти поступает из Западной Сибири; без учета поставок на Комсомольский НПЗ

Крайней точкой нефтепроводной системы ВСТО II является специальный морской нефтепорт Козьмино, объём экспорта через который в 2019 г. составил 33,2 млн т, что на 6,1 % больше, чем в предыдущем году. В настоящее время мощности порта по перевалке нефти полностью загружены.

Страны Азиатско-Тихоокеанского региона – основное направление транспортировки нефти из

Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия). Значительная часть поставок, до 78 % в 2019 г., осуществляется в Китай. Выгодное расположение порта позволяет отгружать нефтяное сырьё и в другие страны АТР, например, Японию (7 %) и Южную Корею (6 %). Меньшие объёмы поставок приходится на Новую Зеландию, Малайзию, Сингапур, Филиппины, Таиланд и США. В последние годы, рост поставок нефти в США, позволил России занять второе место среди поставщиков нефти в эту страну.

Помимо восточного направления, экспорт углеводородов и продуктов их переработки в Азиатско-Тихоокеанский регион также осуществляется из портов в европейской части России.

Рынок Азиатско-Тихоокеанского региона является важным направлением российской экспортной газовой политики. До декабря 2019 г. поставки природного газа осуществлялись только в форме СПГ с завода по сжижению газа в рамках проекта «Сахалин-2», акционерами разработки которого является ОАО «Газпром», Shell, Mitsui и «Мицуи» Mitsubishi. Основным экспортным направлением транспортировки СПГ являются страны АТР – Китай, Тайвань, Южная Корея и Япония.

В 2019 г. в региональной структуре Япония продолжила занимать лидирующее положение среди стран АТР. По итогам года объём экспорта СПГ в Японию из России сократился на 1,6 млн т и составил 6,2 млн т. Вторым важным направлением поставок сжиженного газа на экспорт является Южная Корея, в 2019 г. объём транспортировки увеличился на 0,1 млрд куб. м, чем в 2018 г. (2,2 млн т). Экспорт в Тайвань в 2018 г. уменьшился на 1,1 млн т и составил 1,6 млн т. Однако наблюдалось увеличение экспорта СПГ в Китай с 0,7 млн т до 1,5 млн т, преимущественно за счёт развития проекта Ямал-СПГ, но основу пока составляет проект «Сахалин-2».

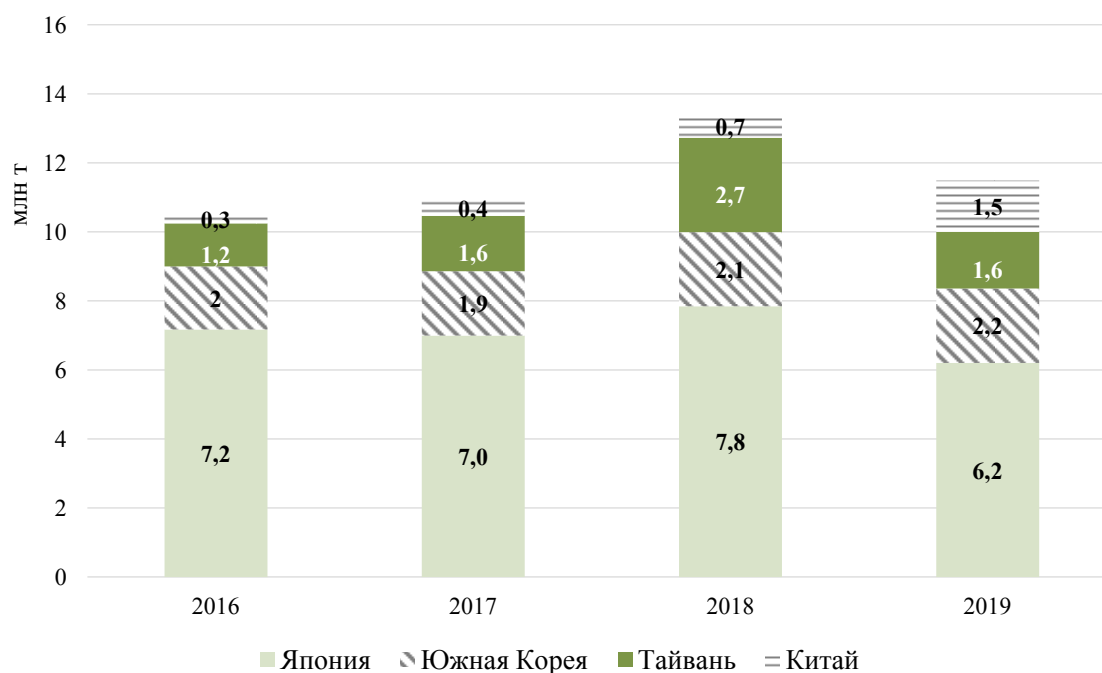


Рис. 4. Экспорт сжиженного природного газа из России в страны АТР



## Транспортная инфраструктура экспортного назначения

Восточное направление экспортных поставок нефти получило развитие с началом эксплуатации трубопроводной системы «Восточная Сибирь – Тихий океан» (ВСТО). Строительство магистральной инфраструктуры на востоке страны и отводящих нефтепроводов стимулировало освоение ресурсного потенциала регионов Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия). Нефтепровод ВСТО объединил единой транспортной системой нефтяные месторождения Западной и Восточной Сибири с портовой инфраструктурой на Дальнем Востоке. Такая интеграция открыла новые возможности сотрудничества со странами Азиатско-Тихоокеанского региона в энергетической сфере.

Магистральный трубопровод ВСТО спроектирован из двух крупных участков. Во-первых, это участок ВСТО I по направлению «Тайшет-Сковородино» с дальнейшим продолжением на Китай в направлении «Сковородино-Мохэ». Во-вторых, участок ВСТО II по направлению «Сковородино-Козьмино» и выходом на тихоокеанское побережье. Общая протяженность нефтепровода составляет 4740 км. В конце 2019 г. «Транснефть» завершила реализацию проекта «ВСТО», что позволило вывести нефтепровод на максимальную проектную мощность. Максимальный объем перекачки нефти на участке ВСТО-1 составляет 80 млн т нефти в год, на участке ВСТО-2 – 50 млн т нефти. Также в конце 2019 г. начались поставки нефти по нефтепроводу-отводу на Комсомольский НПЗ. В результате общий объем прокачки нефти по ВСТО вырос в 2019 г. на 11 %.

Увеличение мощности нефтепровода ВСТО позволит наращивать объем экспорта через порт Козьмино. Так в 2020 г. ожидаемый объем отгрузки нефти составляет 34 млн т. Увеличение емкости резервуарного парка и дноуглубительные работы должны позволить увеличить мощность порта до 36 млн т нефти в год.

Основой для роста экспортного потенциала природного газа на рынок стран АТР является развитие проектов «Сила Сибири» и «Сила Сибири-2», а также строительство новых мощностей по производству СПГ.

В конце 2019 г. состоялся запуск магистрального газопровода «Сила Сибири». Газопровод спроектирован преимущественно вдоль трассы нефтепровода ВСТО, что с одной стороны в определенной степени удешевило строительство, а с другой стороны позволит в будущем организовать сбор природного газа с месторождений, которые наряду с нефтью содержат и природный газ. Трасса газопровода проходит по территории пяти субъектов РФ – Республики Саха (Якутия), Иркутской и Амурской областей, Еврейской автономной области и Хабаровского края. Маршрут трассы «Силы Сибири» проложен вдоль действующего магистрального нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан». Максимальная прокачка газа по трубе может составить 38 млрд куб. м газа в год. Источником первых поставок газа является Чаяндинское месторождение в Республике Саха (Якутия), в 2020 г. объем транспортировки газа достигнет 4-5 млрд куб. м. В конце 2022 г. планируется начало подачи газа в газопровод с Ковыктинского месторождения в Иркутской области. Для извлечения гелия и других ценных компонентов из газа уникальных месторождений ведётся строительство Амурского ГПЗ. Ввод в

эксплуатацию первых двух очередей завода планируется в конце 2021 г., а выход на полную мощность ожидается к 2025 г.

На стадии разработки находится проект газопровода «Сила Сибири-2» для транспортировки газа с месторождений Западной Сибири в Китай через территорию Монголии.

## Энергетические рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона

На протяжении последних 40 лет центр роста потребления энергетических ресурсов приходится на страны АТР с быстро растущей экономикой. В период с 1980 г. по 2018 г. доля этого региона в структуре энергопотребления выросла с 17,6 % до 43,2 %. При этом среднегодовой темп прироста потребления энергоносителей в странах АТР составил 4,4 %. По итогам 2018 г. потребление энергоносителей выросло на 4,1 %, или на 237,8 млн т. Крупнейшие потребители энергетических ресурсов в регионе – Китай (23,6 % мирового энергопотребления), Индия (5,8 %), Япония (3,3 %) и Южная Корея (2,2 %).

Одним из ключевых факторов роста энергопотребления в АТР является увеличение численности населения, а также рост числа транспортных средств. Поэтому в регионе прогнозируется увеличение потребления всех без исключения энергоносителей для удовлетворения растущих потребностей населения и развития промышленного потенциала.

## Структура потребления энергоносителей

АТР – крупнейший регион по уровню энергопотребления, определяющий основные тенденции в изменении структуры энергопотребления. В Азиатско-Тихоокеанском регионе потребляется более 41 % мировых энергетических ресурсов.

В структуре энергопотребления в АТР доминирует уголь, доля которого составляет 48 %. Высокая доля угля обусловлена тем, что в период бурного роста экономики Китая с начала 2000-х гг. все возрастающий спрос на энергию обеспечивался преимущественно за счет внутренних ресурсов – добычи угля. Однако в последнее десятилетие Китай высокими темпами развивает газотранспортную инфраструктуру для обеспечения импортных поставок и развивает собственную добычу природного газа, при этом с 2014 г. сокращается добыча угля. В то же время спрос на уголь поддерживается со стороны Индии и Индонезии: за период 2010–2018 гг. потребление угля в этих странах выросло на 56 %.

Второй по объему потребления энергоноситель – нефть, спрос на которую характеризуется стабильным ростом. С 2010 г. потребление нефти в АТР выросло на 26 %, а среднегодовой темп прироста составил 3,4 %. Основными потребителями нефти в регионе являются Китай (38 %), Индия (14 %) и Япония (11 %). При этом в Японии с 2012 г. потребление нефти стабильно сокращается средним темпом 3,4 % в год (рис.5).

На природный газ приходится 11,9 % энергопотребления. С 2010 г. потребление выросло на 43 %, а среднегодовой темп прироста составил 5,2 %. Быстрее всего спрос растет в Китае, где за период 2010–2018 гг. потребление выросло в 2,6 раза. Также высоким темпом потребление газа растет в Австралии, Японии, Южной Корее.

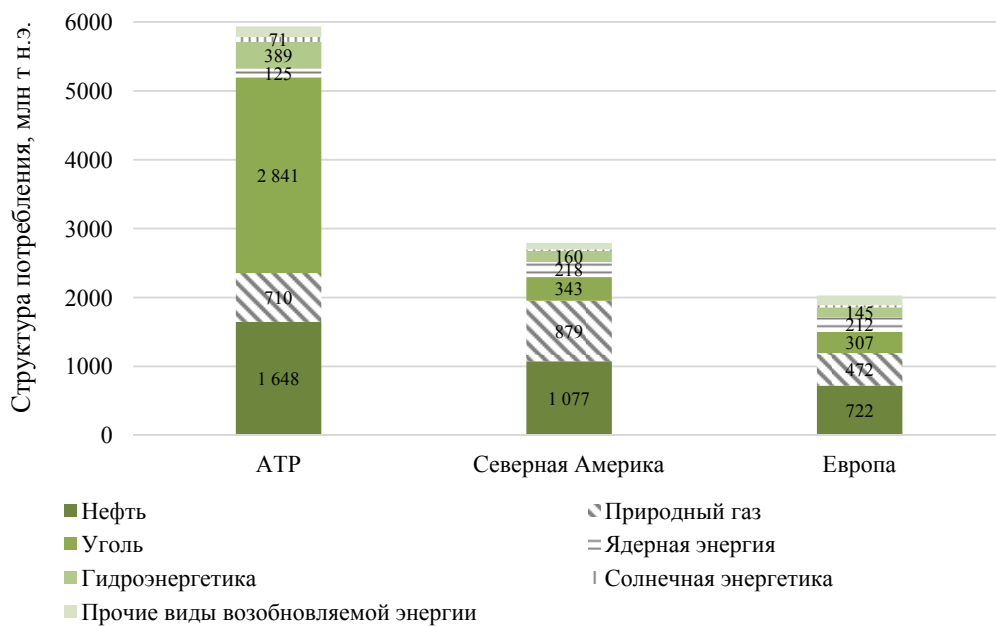


Рис. 5. Структура потребления энергетических ресурсов в странах АТР

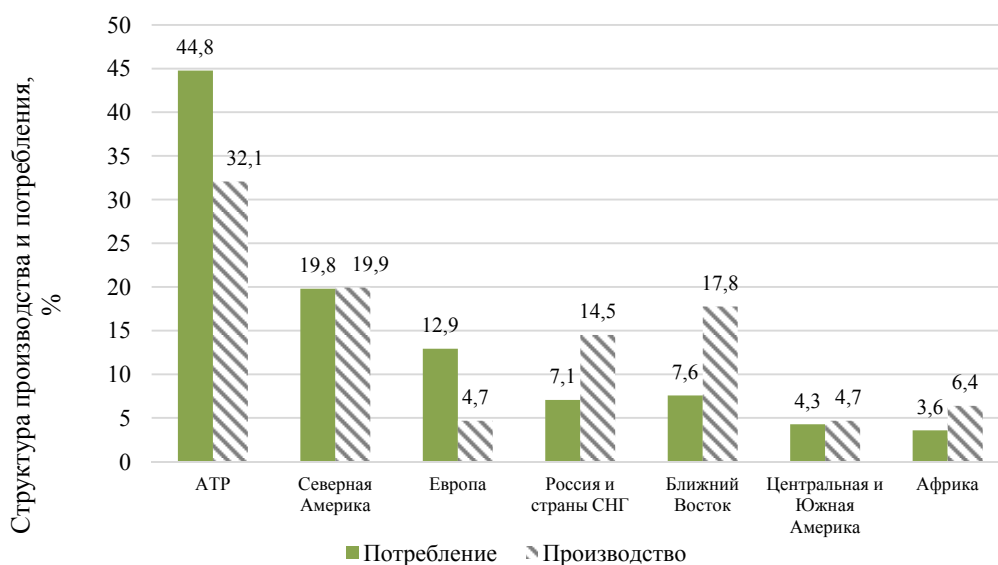


Рис. 6. Структура производства и потребления ископаемых энергоносителей

На развитие ядерной энергетики в регионе серьезное влияние оказала авария на АЭС Фукусима-1 в 2011 г., в результате чего Япония (крупнейший потребитель ядерной энергии до аварии) сократила производство ядерной энергии к 2018 г. на 83 %. В то же время высокими темпами вводятся новые мощности в Китае, где производство ядерной энергии за 2010-2018 гг. выросло в 4 раза, что сделало Китай третьей страной по объёму выработки ядерной энергии после США и Франции. Благодаря этому доля ядерной энергии в структуре потребления выросла до 2,1 %.

Доля альтернативной энергетики в структуре энергопотребления составляет 3,8 %. С 2010 г. производство энергии из альтернативных источников выросло более чем в 5,5 раз, а среднегодовой темп прироста составил 28 % в год. Крупнейшими потребителями альтернативной энергетики являются Китай (64 %), Индия (12 %) и Япония (11 %).

### Структура производства ископаемых энергоносителей

В настоящее время происходит рост добычи ископаемых энергоносителей во всех регионах мира, за исключением Европы и Южной Америки [9].

Азиатско-Тихоокеанский регион является не только крупнейшим потребителем энергетических ресурсов (рис. 6), но с 2000-х гг. и крупнейшим производителем ископаемых энергоносителей, на долю региона приходится 32,1 % мирового производства. Пик роста производства пришелся на период 2000–2011 гг., за который добыча ископаемых энергоносителей выросла в два раза, а среднегодовой темп прироста составил 6,5 %. Однако после 2011 г. рост добычи ископаемых энергоносителей резко замедлился: за 2012–2018 гг. объём добычи вырос только на 6,3 %, а среднегодовой темп прироста упал до 1 %.

Несмотря на высокий уровень добычи ископаемых энергоносителей, объём чистого импорта в АТР составляет более 1,4 млрд т н.э., что соответствует 27,7 % общего объёма внутреннего потребления в регионе. Крупнейшими импортерами энергетических ресурсов являются как страны с развивающейся экономикой (Китай, Индия), так и с развитой (Япония, Южная Корея, Сингапур).

### Рынок нефти

Добыча нефти в Азиатско-Тихоокеанском регионе составляет 361,6 млн т, или 8,1 % от мировой добычи. Пик добычи нефти в регионе пришелся на 2010 г. и составил 403,5 млн т. Однако тенденция к сокращению добычи в ряде стран региона, а также замедление прироста добычи в Китае, а с 2016 г. резкое его падение привело к постепенному сокращению добычи нефти в регионе.

Китай – крупнейший производитель нефти в регионе. На его долю приходится 4,2 % мировой добычи. Пик добычи пришелся на 2015 г. и составил 214,6 млн т (рис. 7). Однако в последующие 3 года добыча упала на 12 %, что связано с высокой интенсивностью добычи и истощением месторождений. Остановить падение добычи удалось в 2019 г. благодаря существенному росту инвестиций в геологоразведочные работы и развитие нефтедобычи в 2018 г. Крупнейшие месторождения расположены в Северо-Восточной части страны – это группа месторождений Дацин (Чанво, Дацин, Синьчжоу и др.), Ляохэ. Высоким потенциалом открытия новых месторождений располагает западая часть Синьцзян-Уйгурского китайского региона.

Другие крупные производители нефти в регионе – Индия (39,5 млн т), Индонезия (39,5 млн т) и Малайзия (31,5 млн т). При этом в Индии и Индонезии сохраняется тенденция к сокращению добычи нефти.

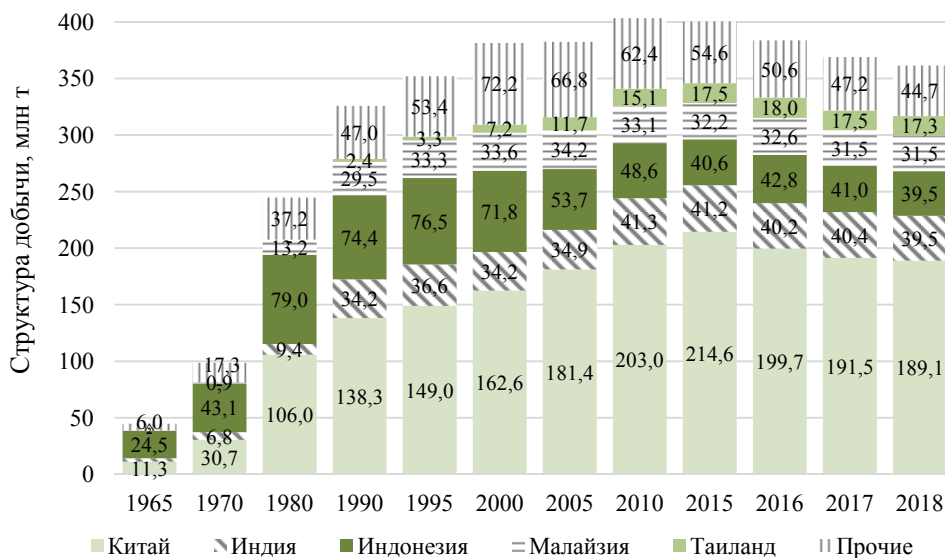


Рис. 7. Структура добычи нефти в странах АТР

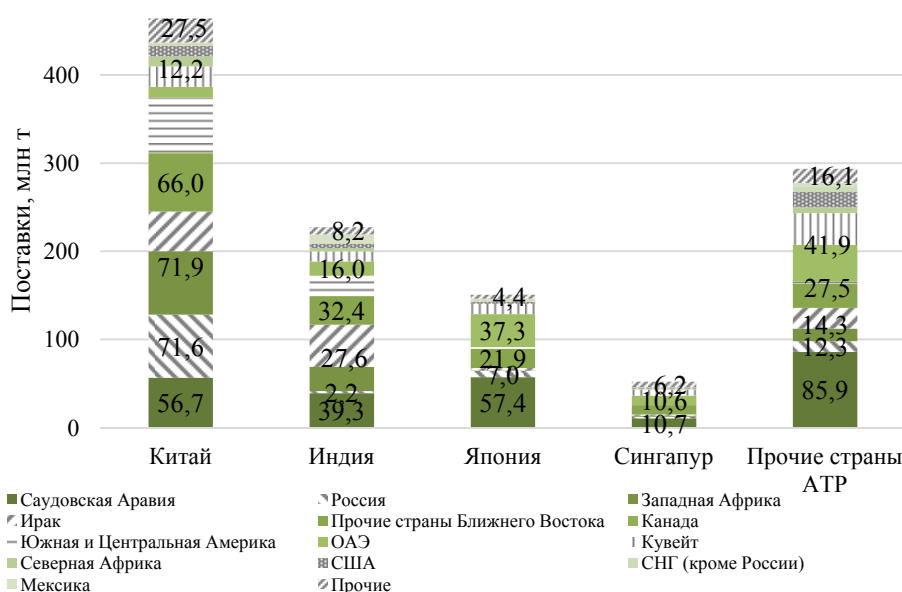


Рис. 8. Источники поставок нефти на рынок стран АТР

Крупнейший импортер нефти – Китай, закупающий на международном рынке 465 млн т нефти, или 74 % от внутреннего потребления [8]. Поставки нефти в Китай достаточно диверсифицированы (рис. 8). Крупнейшими поставщиками нефти в Китай являются Россия (15,4 % от общего объема импорта), Саудовская Аравия (12,2 %), Ирак (9,7 %). Всего страны Ближнего Востока обеспечивают 44 % поставок нефти. Из стран Западной Африки поставляется 15,5 % нефти, из Южной и Центральной Америки – 13,3 %.

Высокими темпами растет потребление нефти в Индии, при этом с 2011 г. сокращается собственная добыча. Объем международных поставок нефти в Индию составляет 227,5 т, что соответствует 96,2 % внутреннего потребления. Чистый импорт в Индию составляет 83,3 % внутреннего потребления. Основные объемы нефти поставляются из Ирака (21 %), Саудовской Аравии (17,3 %) и других стран Ближнего Востока (14,2 %).

Четвертая страна по объему импортируемой нефти – Япония. Крупнейшие поставщики нефти на японский рынок – Саудовская Аравия (38,1 % от общего объема импорта), Объединенные Арабские Эмираты (24,7 %), Кувейт (7,7 %), Россия (4,7 %). Всего Япония импортирует 150,8 млн т нефти.

### Рынок газа

Бурный экономический рост в странах АТР привел к такому же росту потребностей в энергетических ресурсах. Несмотря на относительно невысокие запасы ископаемых энергоносителей в регионе, их добыча на протяжении 1990-х – 2000-х гг. возрастала высокими темпами. Так, среднегодовой темп прироста добычи природного газа за период 2000–2018 гг. составил

4,7 %. В 2018 г. в регионе добыто 631,7 млрд куб. м газа или 16,3 % от мировой добычи.

Крупнейшими производителями природного газа в регионе являются Китай и Австралия, которые с 2010 г. нарастили производство на 67 % и 140 % соответственно. Крупнейшие потребители природного газа в регионе – Китай, Япония и Южная Корея.

Активная переориентация китайской энергетической промышленности с угля на газ приводит к еще большему ускорению роста спроса на природный газ. На ряду с развитием и диверсификацией международных поставок газа, Китай активно проводит геолого-разведочные работы и приращивает сырьевую базу углеводородов. В 2019 г. компания PetroChina приростила запасы сланцевого месторождения газа в провинции Сычуань на юго-западе Китая до 1,6 трлн куб. м. По данным ЕИА, общие запасы сланцевого газа в Китае существенно превышают запасы США, однако в связи с большой глубиной залегания, требуется разработка новых технологий добычи. В настоящее время доля Китая в структуре производства газа стран АТР составляет 25,6 %.

Второе место по объему добычи природного газа занимает Австралия (20,6 %), третье место – Индонезия (11,6 %). При этом Австралия является крупнейшим поставщиком СПГ на рынок Китая, обеспечивая 44 % импорта СПГ.

В среднем с 2012 г. добыча газа в странах АТР приростала на 19 млрд куб. м в год, основной вклад приходился на Австралию и Китай, в то время как другие страны, как правило, показывали отрицательный прирост, что было связано с падением добычи на месторождениях Сиамского залива.

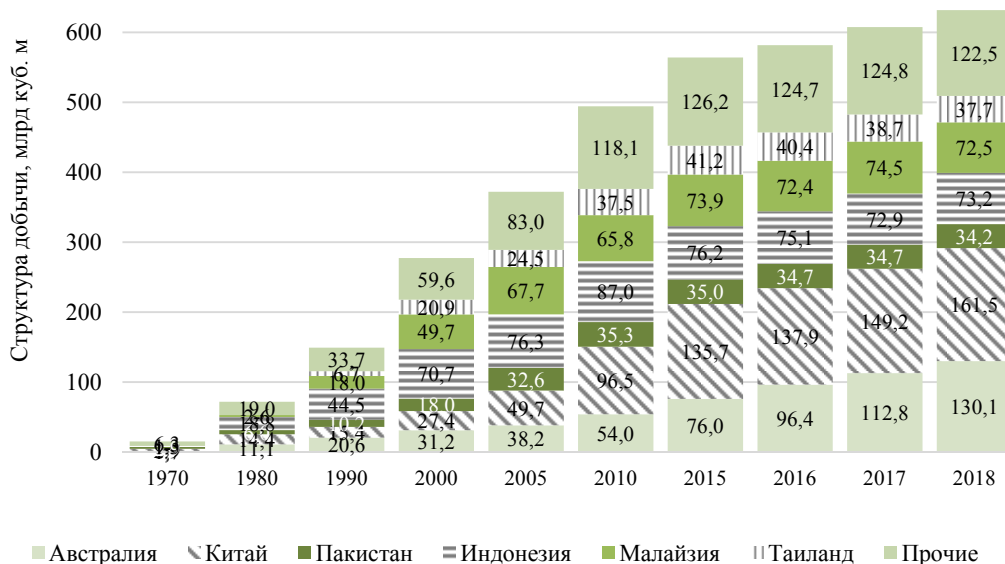


Рис. 9. Структура добычи газа в странах АТР

АТР – второй регион по объему чистого импорта природного газа. Суммарный объем импорта стран АТР составляет 396,8 млрд куб. м газа, в том числе 322,8 млрд куб. м поставляется в виде СПГ. Доля импортируемого газа составляет 48 % от объема потребления.

В АТР располагаются крупнейшие импортеры природного газа и характеризуется как динамично развивающийся регион с высоким потенциалом роста объема импорта природного газа в ближайшей и долгосрочной перспективе. Крупнейшим потребителем природного газа в мире является Китай. С 2010 г.

поставки в страну выросли в 7,4 раз и в настоящее время составляют более 121 млрд куб. м. При этом импортные поставки газа в Китай дифференцированы как по направлениям поставок, так и по способам. На газопроводы приходится 40 % импорта, на СПГ – 61 %.

Второй крупнейший покупатель газа – Япония, которая импортирует 113 млрд куб. м СПГ. На третьем месте по объёму поставок располагается Германия, поставки в которую осуществляются исключительно по газопроводам и составляют около 100 млрд куб. м (рис. 10).

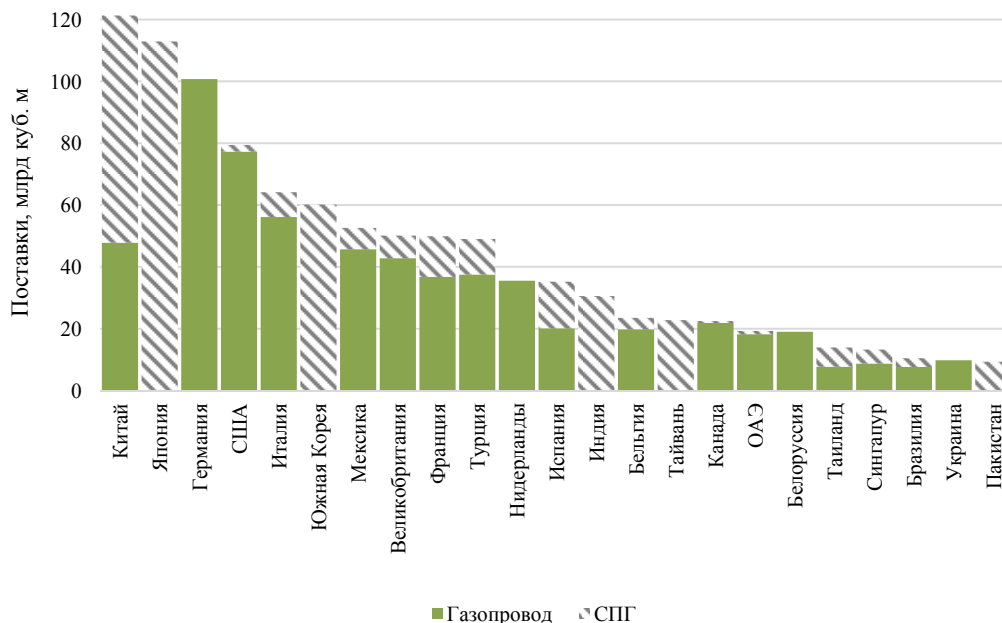


Рис. 10. Крупнейшие импортеры газа

### Перспективы сотрудничества в энергетической сфере

Основой сотрудничества России со странами АТР долгие годы были являлся экспорт сырья, прежде всего углеводородов и металлов. Особенностью восточно-сибирских месторождений является то, что они смешанные по типу флюида, т.е. большинство из них содержат одновременно нефть, газ и конденсат. Вместе с тем, ряд крупных газовых месторождений отличается повышенным содержанием попутных ценных компонентов, таких как этан, пропан, бутаны и гелий. Выделение этих фракций может стать основой развития нефтегазохимических производств на востоке страны. Поэтому если на востоке страны будут созданы мощности по переработке это сложного по составу газа, то Россия сможет решить сразу несколько стратегически важных задач – укрепление приграничной территории, увеличение численности населения за счёт повышения уровня и качества жизни, создания новых рабочих мест, а также дифференцировать доходы от экспорта за счёт реализации продукции с высокой добавленной стоимостью [2, 10].

Высокая концентрация гелия в природном газе восточносибирских месторождений создаёт благоприятные условия для развития гелиевой промышленности на востоке страны. США долгие годы являлось лидером по поставкам гелия на мировой рынок. В период с 2012 по 2018 гг. объем отбора гелия из хранилища Клиффсайд сократился примерно в 2 раза, с 60 до 26 млн куб. м. Гелий в США также извлекается из природного газа, но также наблюдается тенденции сокращения производства в следствии роста добычи сланцевого газа, обеднённого гелием. Снижение уровня поставок гелия из США компенсируют Катар и Алжир, но наблюдается нестабильность

поставок в связи с транспортными и логистическими проблемами или выработанностью месторождений. Вместе с тем центром потребления гелия в мире является Азиатско-Тихоокеанский регион. Поэтому развитие гелиевой промышленности на востоке страны позволит России стать крупнейшим поставщиком стратегического сырья на мировой рынок и создать предпосылки развития новых высокотехнологических отраслей на территории страны (микроэлектроника, криогеника, производство оптоволокна и др.).

Перспективные направления сотрудничества восточных территорий России со странами Азиатско-Тихоокеанского региона, являются:

- В случае роста спроса на нефть возможно увеличение мощности специального морского порта Козьмино за счёт организации поставок, в том числе по железной дороге из Западной Сибири.
- В 2019 г. акционеры проекта «Сахалин-1» (Еххон (30 %), «Роснефть» (20 %), Sodeco (30 %), ONGC (20 %)) приняли решение о строительстве завода по производству сжиженного природного газа в Де-Кастри. Планируемая мощность завода – 6,2 млн т в год, а стоимость строительства оценивается в 10 млрд долл.
- Рассматривается вопрос о строительстве «Восточного нефтехимического комплекса» компанией «Роснефть» при мерах государственной поддержки проекта. В рамках первого этапа планируется создать нефтеперерабатывающий завод мощностью 12 млн т, на втором этапе планируется строительство нефтехимического комплекса мощностью 3,4 млн т в год. Стоимость проекта оценивается в 1,5 трлн руб.
- Поэтапное увеличение поставок по магистральному газопроводу «Сила Сибири». В конце 2022 г. планируется подключение газопровода к Ковыктинскому

месторождению в Иркутской области. Выход газопровода на проектный уровень поставок 38 млрд куб. м. в год планируется после запуска всех очередей Амурского ГПЗ в 2025 г.

• Компанией НОВАТЭК в 2017 г. подписано соглашение о сотрудничестве по созданию на юго-восточном побережье п-ва Камчатка морского перегрузочного СПГ-терминала. Строительство планируется начать в 2020 г. с запуском в эксплуатацию в 2022 г. и предположительным объёмом государственной финансовой поддержки в размере 28,8 млрд руб.

Российские нефтяные компании активно привлекают иностранные инвестиции не только в перспективные проекты, но и в уже действующие активы. Введение секторальных и финансовых санкций со стороны западных государств обусловили необходимость поиска новых источников и направлений заимствования. Так, одним из примеров активного сотрудничества со странами АТР стала компания «Роснефть», активно привлекающая партнёров из Китая и Индии в проекты на востоке страны – «Ванкорнефть», «Таас-Юрях нефтегазодобыча», «Верхнечонскнефтегаз» и «Восточно-Сибирская нефтегазовая компания». Налажено сотрудничество с компаниями ONGC, Oil India, Bharat Petroresources, Beijing Gas, Sinopec и рядом других.

Партнёрские отношения со странами АТР в недропользовании также развивает Иркутская нефтяная компания (ИНК), осуществляющая совместную разработку месторождений Иркутской области и Красноярского края с Японской национальной корпорацией по нефти, газу и металлам (JOGMEC).

Также Роснефть имеет продолжительный опыт успешного сотрудничества с японскими партнерами. В 1996 г. компания привлекла в проект Сахалин-1 пул иностранных компаний - SODECO (30%), ExxonMobil (30%) и ONGC Videsh Ltd. (20%). Акционерами SODECO выступают правительство Японии, Japex, Itochu, Marubeni, Inpex.

Таким образом, богатейший ресурсный потенциал восточносибирских регионов обуславливают инвестиционный интерес для стран АТР. Активное развитие приграничной инфраструктуры, прежде всего для трубопроводной и портовой существенно повышают коммерческую эффективность поставок нефти и газа в Китай и другие страны Азиатско-Тихоокеанского региона. Однако решая задачу налаживания сотрудничества и развития партнёрских отношений, необходимо поддерживать эффективное освоение энергетического потенциала востока страны с точки зрения удовлетворения приоритетов социально-экономического развития региона, уровня и качества жизни населения, темпов роста экономики. Основой такого развития может стать формирование высокотехнологичных отраслей перерабатывающей промышленности на базе углеводородного сырья месторождений Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия).

Создание новых обрабатывающих производств в нефтегазовом комплексе на востоке страны, переориентация технологии выпуска нефтехимической продукции с нефтяного на газовое сырьё, которым в достаточном объёме располагают регионы Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия), а также продолжение развития транспортной инфраструктуры становится все более важной задачей не только

социально-экономического развития регионов и обеспечения энергетической безопасности России, но и служит реализации российских геополитических интересов.

## Литература

1. Андреев П.С. Преимущества и перспективы расширения экспорта сжиженного природного газа из России в страны АТР // Азиатско-Тихоокеанский регион: экономика, политика, право. – 2015. – № 2. – С. 47-55.
2. Ершов Ю. А. Роль Азиатско-Тихоокеанского экономического сотрудничества в экономической политике России // Российский внешнеэкономический вестник. – 2011. – Т. 2011. – № 9. – С. 11-20.
3. Коржубаев А.Г. О стратегии взаимодействия России со странами АТР в нефтегазовой сфере // Проблемы Дальнего Востока. – 2010. – № 2. – С. 64-77.
4. Коржубаев А. Г., Филимонова И. В., Эдер Л. В. Перспективы и условия сотрудничества России и стран Тихоокеанского кольца и Восточной Евразии в энергетической сфере // Пространственная экономика. – 2012. – № 2. – С. 23-29.
5. Телегина Е.А., Федорова В.А. Сжиженный природный газ в азиатско-тихоокеанском регионе: обеспечение энергетической безопасности и возможности экспорта для России // Нефть, газ и бизнес. – 2017. – № 7. – С. 41-50.
6. Филимонова И.В., Немов В.Ю., Проворная И.В., Шумилова С.И., Земнухова Е.А. Анализ транспортных газа на экспорт из России // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 6. – С. 60-65.
7. Филимонова И.В., Проворная И.В., Немов В.Ю. Экспорт нефти и нефтепродуктов из России на фоне мировых тенденций // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 4. – С. 12-20.
8. Christoffersen G. Russia's breakthrough into the Asia-Pacific: China's role // International Relations of the Asia-Pacific. – 2010. – Т. 10. – № 1. – pp. 61-91.
9. Ivanov V. I. Russian Energy Strategy 2020: Balancing Europe with the Asia-Pacific Region // Erina Report. – 2003. – Т. 53. – pp. 13-20.
10. Kuhrt N. The Russian far east in Russia's Asia policy: Dual integration or double periphery? // Europe-Asia Studies. – 2012. – Т. 64. – № 3. – pp. 471-493.
11. Makarov I. A. Transformation of the economic model in Asia-Pacific Region: implications for Russia's Far East and Siberia // The political economy of Pacific Russia. – Palgrave Macmillan, Cham, 2017. – pp. 77-101.

## Сведения об авторах:

**Филимонова Ирина Викторовна**, заведующая Центром экономики недропользования нефти и газа, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Рабочий телефон: +7 (383) 3332814,  
e-mail: FilimonovaIV@list.ru.

**Немов Василий Юрьевич**, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, пр-т Советский, 18, 650991.

Рабочий телефон: +7 (383) 3332814,  
e-mail: Void-pilgrim@mail.ru.

**Проворная Ирина Викторовна**, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, пр-т Советский, 18, 650991.

Рабочий телефон: +7 (383) 3332814,  
e-mail: ProvornayaIV@gmail.com.

**Дзюба Юрий Алексеевич**, младший научный сотрудник Центра экономики недропользования нефти и газа, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Рабочий телефон: +7 (383) 3332814,  
e-mail: Dzyuba\_Ya@mail.ru

Адрес института: 630090 Новосибирск, проспект академика Коптюга 3.

#### **Information about authors:**

**Filimonova Irina**, head of the center for economics of subsoil use of oil and gas, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Koptug Avenue 3, 630090,

phone: +7 (383) 3332814,  
e-mail: FilimonovaIV@list.ru.

**NemovVasily**, Ph.D. (Econ.), senior researcher, Kemerovo Science Center SB RAS, Kemerovo, Sovetsky Ave., 18, 630090,

phone: +7 (383) 3332814,  
e-mail: Void-pilgrim@mail.ru.

**Provornaya Irina**, Ph.D. (Econ.), senior researcher, Kemerovo Science Center SB RAS, Kemerovo, Sovetsky Ave., 18, 630090,

phone: +7 (383) 3332814,  
e-mail: ProvornayaIV@gmail.com.

**Dziuba Yuri**, Junior Researcher, center for economics of subsoil use of oil and gas, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Academician Koptug Avenue 3, 630090,

phone: +7 (383) 3332814,  
e-mail: Dzyuba\_Ya@mail.ru.



**ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСЧЕТА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ,  
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СТАБИЛИЗАТОРАХ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Кандидат техн. наук **Бедрицкий И.М.**,  
кандидат техн. наук **Жураева К.К.**

(Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта. Республика Узбекистан)

**ESTIMATION OF ERRORS IN CALCULATIONS OF FERROMAGNETIC ELEMENTS  
OF THE PARAMETRIC STABILIZERS OF VEHICLES**

**I.M. Bedritskiy**, Ph.D. (Tech.),  
**K.K. Zhurayeva**, Ph.D. (Tech.),

(Tashkent Institute of Railway Engineering. Republic of Uzbekistan)

*Транспортные средства, полином, аппроксимация, ферромагнитный сердечник, удельные потери в стали, математическое моделирование, погрешность аппроксимации.*

*Means of transport, polynomial, approximation, ferromagnetic core, relative losses in steel, mathematical modeling, approximation error.*

*Приводится оценка погрешности расчетов при аппроксимации кривой намагничивания ферромагнитных элементов в стабилизаторах, используемых в транспортных средствах. Показана возможность замены нелинейного сопротивления при математическом моделировании катушки с ферромагнитным сердечником линейным сопротивлением. Выполнен анализ условий, при которых эта замена возможна для нелинейных катушек параметрических стабилизаторов напряжения и тока феррорезонансной и параметрической природы, а также оценивается величина возникающих при этой замене относительных погрешностей.*

*In the article proposed an estimate of the calculation error when approximating the magnetization curve of ferromagnetic elements in stabilizers used in the means of transport. The possibility of replacing the nonlinear resistance in mathematical modeling of a coil with a ferromagnetic core with a linear resistance is shown. The conditions under which this replacement is possible for nonlinear coils of parametric voltage and current stabilizers of ferroresonance and parametric nature are analyzed, and the value of relative errors arising during this replacement is estimated.*

Параметрические источники вторичного электропитания, в частности ферромагнитные и феррорезонансные стабилизаторы, находят применение в транспортных средствах (например, на водном транспорте, в космических аппаратах, в устройствах зарядки аккумуляторов и т.п.) для возможности их работы в тяжелых средах (высокие и низкие температуры, радиация, сильные электрические и магнитные поля).

Аналитическое описание амплитудно-фазовых соотношений в ферромагнитных и феррорезонансных устройствах предполагает аппроксимацию характеристик намагничивания входящих в эти устройства катушек с ферромагнитными сердечниками. Для аппроксимации петли гистерезиса в таких материалах наиболее часто используют модели Джилса-Атертона, Чана и другие [2, 3, 4, 18]. Однако, если катушки в названных устройствах работают при высоких значениях магнитной индукции, то во многих случаях пренебрегают явлениями гистерезиса при намагничивании. В этом случае в качестве магнитной характеристики катушки с ферромагнитным сердечником обычно пользуются основной кривой намагничивания, которую аппроксимируют определенным алгебраическим выражением.

На выбор вида аппроксимирующей функции, описывающей кривую намагничивания, влияет характер решаемой задачи и принятые допущения по точности ее решения, однако наиболее существенным является вы-

полнение двух условий: максимально возможное совпадение опытной кривой намагничивания ферромагнитного материала сердечника с аппроксимирующей кривой и получение простых и удобных для последующих преобразований выражений. При решении задач качественного характера наиболее существенным является второе условие.

Как следует из литературных источников [7, 9, 15, 16, 17], наиболее часто для аппроксимации кривой намагничивания применяются следующие функции: полный полином нечетной степени, гиперболические синус и тангенс, кусочно-линейная аппроксимация, аппроксимация сплайнами. Основным недостатком этих аппроксимаций – сложность в преобразовании расчетных выражений и относительно низкая наглядность полученных результатов.

Целью данного исследования является проверка пригодности неполных полиномов нечетной степени для аппроксимации кривой намагничивания холоднокатаной электротехнической стали, как наиболее часто используемой при конструировании ферромагнитных элементов нелинейных преобразователей, в частности – стабилизаторов напряжения. Достоинством неполных полиномов нечетной степени является простота преобразования и наглядность интерпретации результатов расчетов.



Исходя из физической природы намагничивания, наиболее пригодным для аппроксимации является неполный полином вида

$$H = k \cdot B^n, \quad (1)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля;  $k$  – линейный коэффициент;  $B$  – магнитная индукция;  $n$  – любое целое положительное нечетное число, больше единицы. Задачей исследования является проверка выбранной аппроксимирующей функции по критерию точности, для чего необходимо найти значения  $k$  и  $n$ , дающие минимальные погрешности аппроксимации. Для решения поставленной задачи использовался метод наименьших квадратов, заключающийся в определении коэффициента  $k$  выражения  $H = k \cdot B^n$ , если известны экспериментальные пары значений  $H$  и  $B$  при заданном  $n$ . Линеаризация зависимости (1) производилась путем замены  $B^n = k \cdot P$ . Кроме того, выражение для нахождения коэффициента  $k$  с учетом обязательного прохождения аппроксимирующей кривой через точку  $H=0$  и  $B=0$  было модифицировано к виду

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot \sum_{i=1}^N H_i - N \cdot (\sum_{i=1}^N P_i \cdot H_i)}{(\sum_{i=1}^N P_i)^2 - N \cdot (\sum_{i=1}^N P_i)}, \quad (2)$$

где  $N$  – количество экспериментальных точек в кривой намагничивания;  $i$  – номер экспериментальной точки.

На рис. 1 приведены графики зависимостей  $B=f(H)$ , построенные на основе неполных полиномов, приведенных в подрисуточных надписях. Оптимизированные коэффициенты  $k$  полиномов рассчитаны по выражению (2) для холоднокатаной электротехнической стали Э360 (3424) по 20 точкам в диапазоне изменения индукции от 0 до 2Тл, где штриховой линией показана экспериментальная кривая зависимости  $H = k \cdot B^n$ .

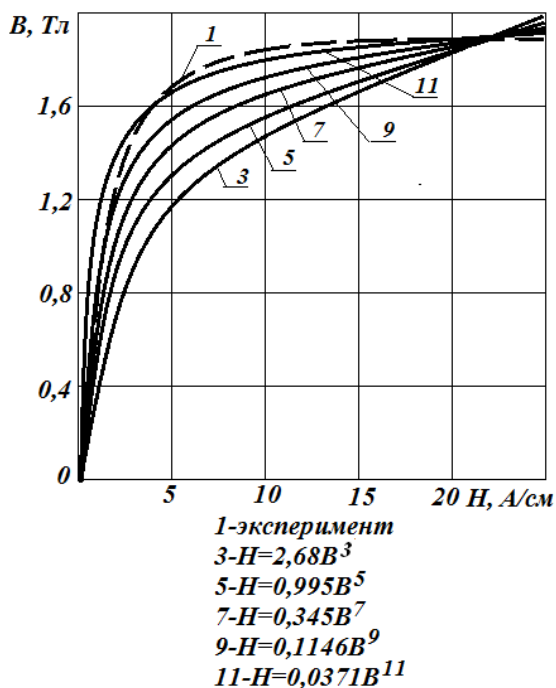


Рис. 1. Экспериментальная и аппроксимированные кривые намагничивания электротехнической стали Э360(3424)

Из этих графиков видно, что для аппроксимации кривых намагничивания холоднокатаных электротехнических сталей наиболее пригодными являются неполные полиномы 9 и 11 степеней.

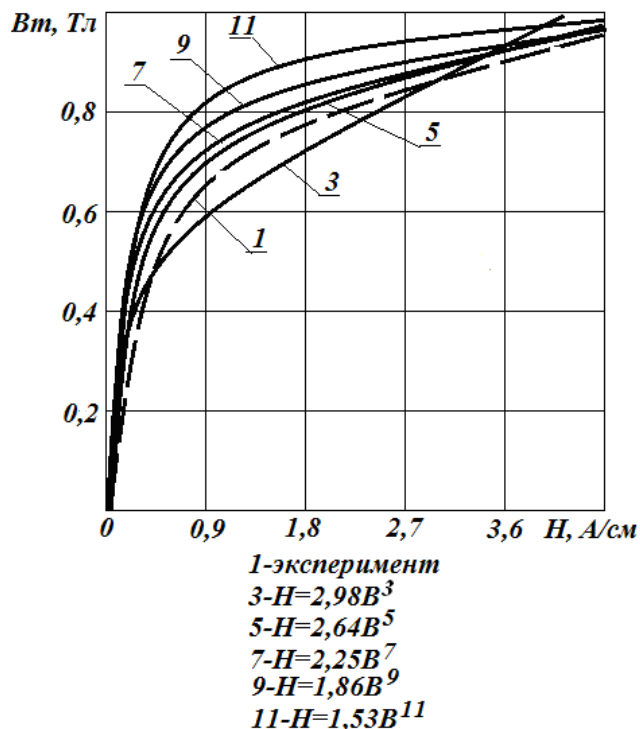


Рис. 2. Экспериментальная и аппроксимированные кривые намагничивания электротехнической стали Э41(1511)

На рис. 2 приведены графики зависимостей  $B=f(H)$ , построенные на основе неполных полиномов, приведенных в подрисуточных надписях. Оптимизированные коэффициенты  $k$  полиномов рассчитаны по выражению (2) для горячекатаной электротехнической стали Э41 (1511) по 20 точкам в диапазоне изменения индукции от 0 до 1Тл, где штриховой линией показана экспериментальная кривая зависимости  $H = k \cdot B^n$ . Из этих графиков видно, что для аппроксимации кривых намагничивания горячекатаных электротехнических сталей наиболее пригодными являются неполные полиномы 3 и 5 степеней.

Для объективной оценки погрешностей аппроксимации исследуем характер изменения и величину относительной погрешности аппроксимации, которая может быть найдена из выражения

$$\delta(\%) = \left| \frac{H_i - H_{iA}}{H_i} \right| \cdot 100\%,$$

где  $H_i$  – экспериментальное значение напряженности магнитного поля в  $i$ -й точке;  $H_{iA}$  – значение напряженности магнитного поля, вычисленное по аппроксимирующей функции. Кривые зависимости  $\delta(\%)=f(H)$  для неполных полиномов степеней от 3 до 11 для холоднокатаной стали Э360(3424) показаны на рис. 3.

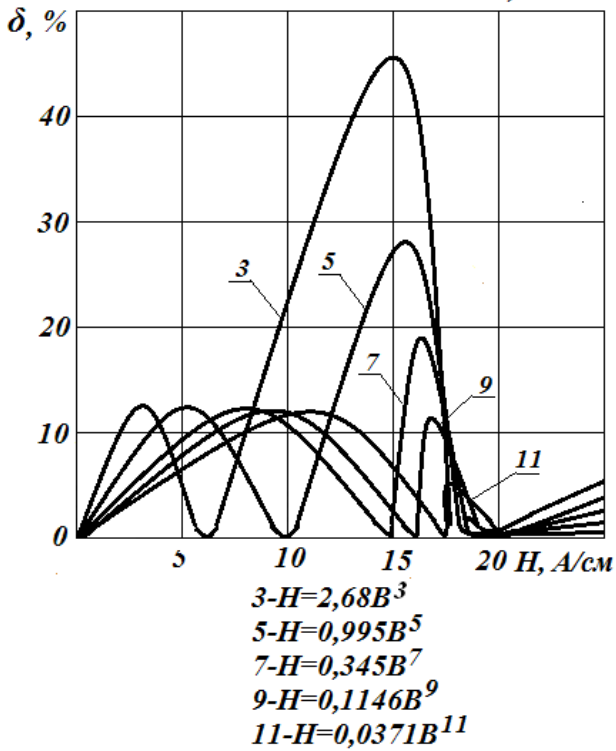


Рис. 3. Относительны погрешности аппроксимированных кривых намагничивания электротехнической стали Э360 (3424)

Из графиков видно, что погрешности при аппроксимации полиномами со степенями 9 и 11 дают наименьшие погрешности, не превышающие 12%, что можно считать допустимым при расчете катушек с ферромагнитными элементами.

Кривые зависимости  $\delta(\%)=f(H)$  для неполных полиномов степеней от 3 до 11 для горячекатаной стали Э41(1511) показаны на рис. 4.

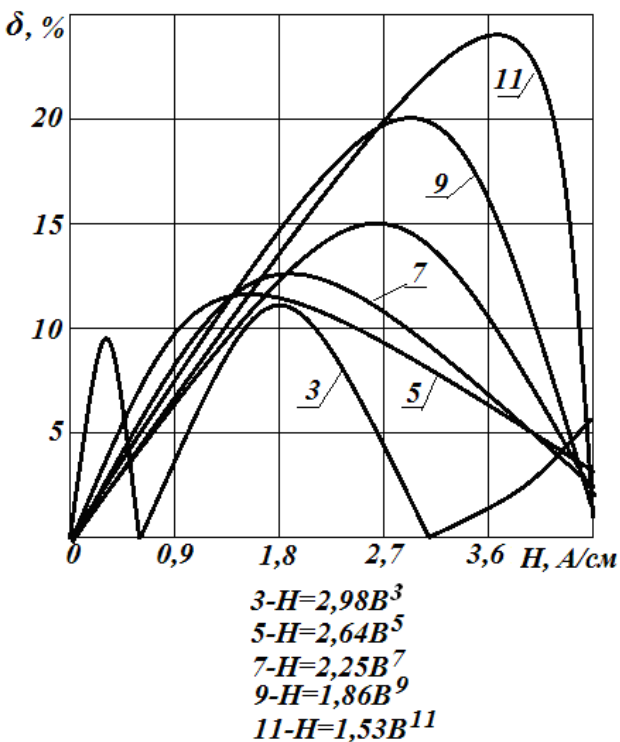


Рис. 4. Кривые зависимости  $\delta(\%)=f(H)$  для неполных полиномов степеней от 3 до 11 для горячекатаной стали Э41(1511)

Из графиков видно, что погрешности при аппроксимации полиномами со степенями 3 и 5 дают наименьшие погрешности, не превышающие 13%, что можно считать допустимым при расчете катушек с ферромагнитными элементами.

Известно, что потери активной мощности в ферромагнитных элементах имеют две основные составляющие – потери в обмотках и потери в сердечниках [8,10,11]. В математической модели устройств потери в этих обмотках моделируются линейными активными сопротивлениями (проводимостями), подключаемыми параллельно этой нелинейной катушке [1,5,7]. Так как между величинами активных потерь в обмотках и величиной присоединенной нагрузки существует линейная зависимость, то эти же сопротивления могут имитировать и подключаемую активную нагрузку [7, 11].

Современные исследования катушек с ферромагнитными элементами направлены в основном на утончение дополнительных потерь – температурных потерь, потерь на резку материала сердечника, импульсных и добавочных потерь [2,5,6,8,9,13,14]. Однако потери в стали математических моделей катушек с ферромагнитными сердечниками моделируются нелинейными активными сопротивлениями и проводимостями. Это ведет к существенному усложнению модели нелинейного магнитного элемента и к усложнению преобразований нелинейных выражений, осуществляемых во время анализа цепи, так как приходится одновременно преобразовывать два аппроксимирующих выражения – для кривой намагничивания материала сердечника и для нелинейной проводимости, имитирующей потери в стали магнитопровода.

На рис. 5 показаны зависимости удельных потерь в сердечнике от амплитуды магнитной индукции при частоте  $f=50$  Гц для трех характерных типов магнитомягких материалов: электротехнической стали Э360 (кривая 1), магнитного сплава 79НМ (кривая 2) и феррита марки 2500 НМС (кривая 3), построенные на основе выражений:

1) для электротехнической стали Э360

$$P_m = p_o \cdot \left(\frac{f}{1000}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{B_m}{1}\right)^{1,6} = 0,166 \cdot 0,05^{1,2} \cdot B_m^{1,6} \left(\frac{B_m}{\text{см}^3}\right)$$

2) для магнитного сплава 79НМ

$$P_m = p_o \cdot \left(\frac{f}{1000}\right)^{1,6} \cdot \left(\frac{B_m}{1}\right)^2 = 0,046 \cdot 0,05^{1,6} \cdot B_m^2 \left(\frac{B_m}{\text{см}^3}\right)$$

3) для феррита марки 2500 НМС

$$P_m = p_o \cdot \left(\frac{f}{1000}\right)^{1,4} \cdot \left(\frac{B_m}{1}\right)^{1,9} = 0,034 \cdot 0,05^{1,4} \cdot B_m^{1,9} \left(\frac{B_m}{\text{см}^3}\right)$$

Из кривых видно, что зависимость  $p_m=f(B_m)$  носит нелинейный характер.

Аппроксимируем полученные зависимости прямыми линиями вида  $p_m = k \cdot B_m$  (линии 1', 2', 3'), коэффициент  $k$  которых рассчитан по методу наименьших квадратов [1], заключающийся в определении коэффициента  $k$  из выражения  $p_m = k \cdot B_m$ , если известны экспериментальные пары значений  $H$  и  $B$  при заданном  $N$ . Кроме того, выражение для нахождения коэффициента

$k$  с учетом обязательного прохождения аппроксимирующей кривой через точку  $P_m=0$  и  $B_m=0$  было модифицировано к виду

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N P_{mi} \cdot \sum_{i=1}^N B_i - N \cdot (\sum_{i=1}^N P_{mi} \cdot B_i)}{(\sum_{i=1}^N P_{mi})^2 - N \cdot (\sum_{i=1}^N P_{mi})}$$

где  $N$  – количество экспериментальных точек в кривой намагничивания;  $i$  – номер экспериментальной точки.

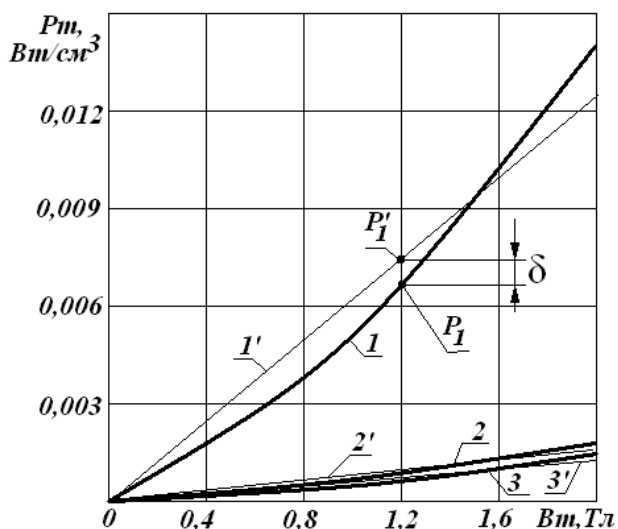


Рис. 5. Зависимости потерь в стали Э360 (3424) от частоты и амплитуды магнитной индукции в диапазоне изменения индукций от 0 до 2Тл

Величина относительной погрешности аппроксимации во всем диапазоне изменения индукций может быть вычислена по выражению

$$\delta(\%) = \left| \frac{P_1 - P_1'}{P_1} \cdot 100 \right|, \quad (3)$$

где  $P_1$  – удельные потери, вычисленные по выражению (1);  $P_1'$  – удельные потери, найденные при использовании аппроксимацией прямой линией.

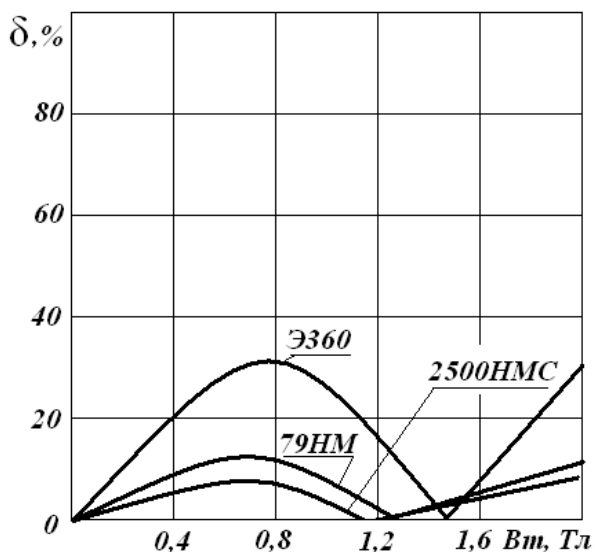


Рис. 6. График зависимостей относительной погрешности аппроксимации от величины магнитной индукции

График зависимости  $\delta(\%)=f(B_m)$  показан на рис. 6. Очевидно, что линейная аппроксимация зависимости  $p_m = k \cdot B_m$  на всем диапазоне изменения амплитуд магнитных индукций является непригодной, особенно, если рассматривать не только качественные, но и количественные параметры стабилизаторов, так как относительная погрешность аппроксимации достигает в определенном диапазоне 27%.

Однако линейная аппроксимация становится возможной и даже весьма точной, если учесть реальные режимы работы стабилизаторов. Исходя из характера работы катушек в феррорезонансном стабилизаторе, величины магнитных индукций в магнитных компонентах стабилизатора находятся в пределах 1,2 -1,6 Тл для балластного элемента и 1,85-1,95 Тл – для феррорезонансного контура. Это позволяет выбирать аппроксимирующие функции для удельных потерь в магнитопроводе не от нулевых значений, а от названных выше значений индукции, например от величины, равной 1,2 Тл.

На рис. 7 приведен график зависимости  $p_m = f(B_m)$  для электротехнической стали Э360 (кривая 1) и аппроксимирующей прямой (прямая 1'). Сталь Э360 выбрана по той причине, что для нее величина относительной погрешности аппроксимации была максимальной, причем диапазона изменения амплитуд магнитных индукций сузился до величин от 1,2 до 2,0Тл. График построен на основании метода наименьших квадратов, прямая аппроксимирована линейной зависимостью вида  $p_m = k \cdot B_m + P$ , где  $P$  – значение удельных потерь при  $B_m=0$ .

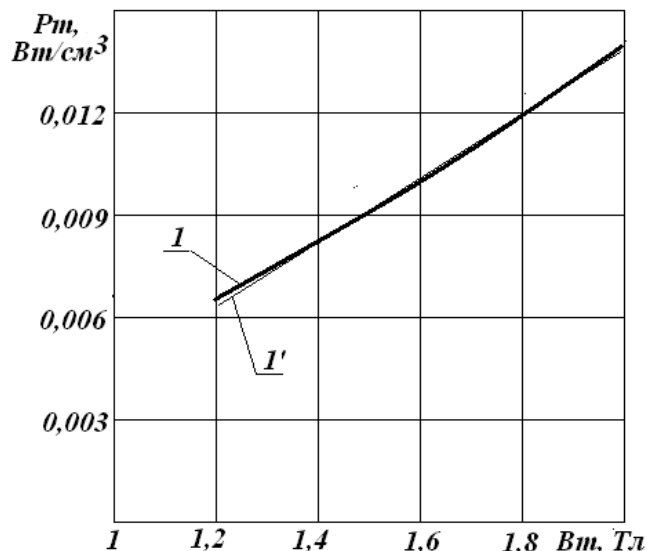


Рис. 7. Зависимость величины потерь от амплитуды магнитной индукции

Из графика видно, что точность аппроксимации достигает весьма высоких значений. Рассмотрим относительную погрешность аппроксимации, используя выражение (3). График зависимости  $\delta=f(B_m)$  показан на рис. 8.

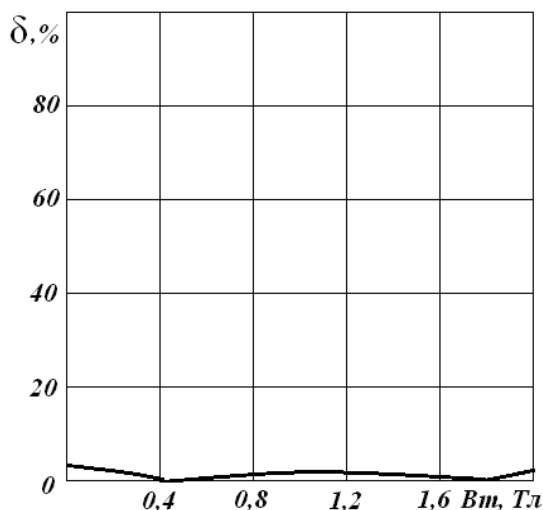


Рис. 8. Зависимость относительной погрешности аппроксимации от амплитуды магнитной индукции

Из графика видно, что погрешность аппроксимации становится меньше 2%, следовательно, линейная аппроксимация вида  $p_m = k \cdot Bm + P$  может считаться вполне допустимой как при качественном анализе работы стабилизаторов, так и при количественных расчетах.

Как подтверждает опыт анализа подобных цепей и экспериментальные данные, суммарная погрешность (модели и метода) не превышает в самом худшем случае величины 15%, что является допустимой величиной при качественном анализе параметрических цепей и для ориентировочного инженерного расчета параметрических стабилизаторов, используемых в транспортных средствах. В случае наличия в феррорезонансной цепи параллельных феррорезонансных контуров погрешность расчетов становится еще меньше, так как такие контуры благодаря своим фильтрующим свойствам улучшают гармонический состав стабилизированных напряжений и токов [2,12, 15, 16, 17].

### Литература

1. Алиев И.И. Электротехнический справочник. – 4-е изд. испр. – М.: ИП Радио Софт, 2006. – 384с.
2. Глебов Б.А., Каюков Д.С., Недолужко И.Г. Модели магнитных компонентов// Практическая силовая электроника. 2003. №11.
3. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis// Journal of magnetism and magnetic materials. 1986. Vol. 61. № 06.
4. Новиков А.А., Амелин С.А. Экспериментальное исследование параметров модели перемагничивания ферромагнетиков Джилса - Атертона// Электричество – 1995 – № 9.
5. Тимофеев И.А. Удельные потери в ферромагнетике// Успехи современного естествознания. – 2007. – № 8. – С. 91-94.
6. Прибылова Н.В., Филонов С.А., Аксенов И.И. Потери на вихревые токи в обмотках электрических машин, вынесенных в воздушный зазор//В сборнике: Наука вчера, сегодня, завтра. Материалы научно-практической конференции. 2016. С. 236-239.

7. Бедрицкий И.М. Принципы моделирования магнитных компонентов в программах компьютерной симуляции.// Международная научно-практическая конференция «Инновация -2014», ТашГТУ, Узбекистан, г. Ташкент: 2014.–с. 33-38.

8. Афанасьев А.А. Расчет магнитных потерь электромеханических устройств//Электричество. 2016. № 6. С. 25-33.

9. Hiruma S., Otomo Y., Igarashi H. Eddy current analysis of litz wire using homogenization-based fem in conjunction with integral equation. IEEE Transactions on Magnetics. 2018. Т. 54. № 3. С. 700-704.

10. Привалов Е.Е. Электротехническое материаловедение: учебное пособие/М.-Берлин: Директ-медиа, 2015 –234 с.

11. Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры: справочник. М.: Радио и связь, 1991.–224 с.

12. Данилов Л.В., Матханов П.Н., Филиппов Е.С. Теория нелинейных электрических цепей. Л: Энергоатомиздат, 1990.–256 с.

13. Астахов В.И., Данилина Э.М. Влияние разреза пластины на вихревые токи электромагнитную силу, испытываемую движущимся витком с током.//Известия РАН, Сер. Энергетика–2014.–№ 6–с.18-28.

14. Данилина Э.М., Астахов В.И. Вихревые тока и потери на них в пластине с разрезами//Изв. вузов. Электромеханика.–2014.–№ 4.–С. 5-9.

15. Бедрицкий И.М. Сравнительный анализ аналитических выражений для аппроксимации кривых намагничивания электротехнических сталей.// «Электрика», ООО «Наука и технологии», № 7. М.:2011 – с. 38-41.

16. Бедрицкий И.М., Халилов Н.А. К вопросу об аппроксимации кривых намагничивания электротехнических сталей// ИВУЗ РУз, технические науки, № 4, Ташкент: 2002.– с. 33-37.

17. Halilov N.A., Bedritsky I.M. To a question on approximation of curves of magnetization of electro technical steels //NEWS OF HIGH SCHOOLS OF REPUBLIC UZBEKISTAN. Engineering in Life Sciences. 2002. № 4. С. 33.

18. John H. Chan, Andrei Vladimirescu, Xiao-Chun Gao, Peter Liebmann and John Valainis. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation. TRANSACTIONS ON COMPUTER-AIDED DESIGN. VOL.10.1991. № 4.

### Сведения об авторах:

**Бедрицкий Иван Михайлович**, доцент кафедры «Электроснабжение железных дорог». Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта.

Адрес: 100167. Республика Узбекистан. Г. Ташкент, ул. Адилходжаева, 1. ТашИИТ.

Телефон +998712990444.

E-mail: lade00@bk.ru.

**Жураева Камила Комиловна**, доцент кафедры «Электроснабжение железных дорог». Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта.

Адрес: 100167. Республика Узбекистан. Г. Ташкент, ул. Адилходжаева, 1. ТашИИТ.

Телефон +998712990444.

E-mail: lade00@bk.ru.

## ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ПУЛЬСИРУЮЩИМИ ДОЗВУКОВЫМИ ГАЗОВЫМИ ПОТОКАМИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Кандидат техн. наук, доцент **Иванов Д.А.**,  
доктор техн. наук, профессор **Коваленко Г.В.**  
(Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации)

## INFLUENCE OF TREATMENT BY PULSATING SUBSONIC GAS FLOWS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HEAT-STRENGTHENED AIRCRAFT STRUCTURAL ELEMENTS

**D.A. Ivanov**, Ph. D. (Tech.), Associate Professor,  
**G.V. Kovalenko**, Doctor (Tech.), Professor  
(St. Petersburg State University of Civil Aviation)

*Воздушный транспорт, упрочняющая термическая обработка, пульсирующий газовый поток, механические свойства.*

*Air transport, hardening heat treatment, pulsating gas flow, mechanical properties.*

*Описываются разработанные авторами методы повышения механических свойств конструкционных металлических материалов, используемых в элементах конструкции воздушных судов, а также восстановления и повышения конструктивной прочности отремонтированных деталей авиационной техники упрочняющей термической обработкой с дополнительным воздействием пульсирующих дозвуковых газовых потоков.*

*This article describes the methods developed by the authors to improve the mechanical properties of structural metal materials used in aircraft structural elements, as well as to restore and increase the structural strength of repaired aircraft parts by strengthening heat treatment with additional exposure to pulsating subsonic gas flows.*

В процессе эксплуатации термически упрочнённые металлические детали авиационной и аэродромной техники могут испытывать тепловые нагрузки, в результате которых в них происходят структурные изменения, ведущие к снижению конструктивной прочности. Даже наиболее современные способы упрочнения [1-6] не гарантируют защиты подобных негативных структурных изменений. Данные процессы характерны прежде всего для изделий из стали и сплавов в высокопрочном состоянии, к примеру клапанов из силхромов, но могут протекать и в турбинных лопатках. Для последних существует технология определения критических структурных изменений путём замера электросопротивления. В случае же нештатного термического воздействия нежелательные структурные превращения могут происходить в любых авиационных деталях. При обнаружении подобных изменений в процессе диагностирования встаёт вопрос о восстановлении первоначальных свойств термической обработкой.

В процессе восстановительного ремонта термоупрочнённых элементов конструкции авиационной техники используются наплавка и сварка плавлением, в результате которых в изделии появляется зона литого металла и зона термического влияния, обладающие пониженными механическими свойствами в сравнении с основным металлом. В процессе эксплуатации подобных деталей с нагрузками, предусмотренными для кованных и термоупрочнённых изделий возможно разрушение, прежде всего по линии сплавления. Практикуемый в ряде случаев нагрев для уменьшения остаточных напряжений не устраняет неоднородную литую структуру.

Поэтому в случае появления в кованных и штампованных термоупрочнённых деталях при изготовлении и восстановительном ремонте участков литого металла, включая сварные точки при электроконтактной сварке, необходимо проведение полноценной термообработки, включающей закалку.

То же относится к восстановлению наплавкой литых жаропрочных деталей, таких, как турбинные лопатки, приобретающих свои эксплуатационные свойства с применением направленной кристаллизации с последующей двойной закалкой.

Пластически деформированному в процессе эксплуатации металлическому элементу конструкции воздушного судна в процессе ремонта может быть возвращена исходная конфигурация. При этом, во избежание его разрушения в ходе формоизменения, применяется нагрев, который, повышая пластичность, одновременно может способствовать росту зерна и нежелательным структурным превращениям. Для ряда сталей и сплавов подобные структурные изменения устраняются последующей закалкой.

При перекаливании в процессе восстановительного ремонта стальных деталей авиационной и аэродромной техники вместо таких традиционных закалочных сред, как вода и машинное масло может использоваться пульсирующий воздушный поток [7-10].

Так, была осуществлена закалка изделий из конструкционной улучшаемой стали 40X толщиной 20 мм с использованием в качестве закалочной среды нестационарного воздушного потока при скорости последнего порядка 250 м/с. Назначением достаточно высокой скорости воздушного потока было создание отвода тепла

с поверхности закаливаемого изделия, не ниже критического значения скорости закалочного охлаждения. Звуковое давление пульсирующего газового потока достигал 140 дБ, а доминирующая частота около 650 дБ.

Для стали с более высоким содержанием легирующих элементов, тех же силхромов, критическая скорость закалки будет обеспечиваться при несколько раз меньшей скорости охлаждающего воздушного потока.

Преимущество закалки стали в пульсирующем воздушном потоке заключается в следующем: остаточные напряжения, образующиеся в результате традиционной закалки, в полной мере не могут быть устранены даже высоким отпуском. Наблюдаемое после закалки в пульсирующем воздушном потоке пониженное значение структурных остаточных напряжений [8] по сравнению с закалкой в масле является следствием более высокой дисперсности мартенсита в результате образования дополнительных центров возникновения мартенситной фазы под действием механических колебаний, о чём свидетельствует как микроанализ, так и повышение твёрдости при скорости закалки так же выше критического значения, как и при закалке в масле.

Влияние газовых импульсов на напряженно-деформированное состояние закаливаемого стального изделия способствует уменьшению как закалочной деформации, так и остаточных напряжений после закалки.

Для углеродистых и экономнолегированных конструкционных сталей со сравнительно высокой критической скоростью закалки в качестве упрочняющей термической обработки достаточно широко применяется нормализация, основным достоинством которой, в сравнении с термоулучшением, является отсутствие закалочной деформации и трещин.

Исследовалась возможность использования в качестве охлаждающей среды при термоупрочнении изделий из подобных сталей пульсирующего дозвукового воздушного потока. Изделия из стали 40 охлаждались в пульсирующей воздушной струе со скоростью ниже критической скорости закалки.

В случае стали 40X охлаждение до температуры порядка 650°С осуществлялось на спокойном воздухе, с целью избежать образования в поверхностных слоях мартенситной структуры и исключить потребность в последующем отпуске.

Представленные на гистограммах рис. 1 и 2 данные свидетельствуют о достижении более высокого комплекса механических свойств стальных деталей при замене охлаждающей среды со спокойного воздуха на пульсирующий воздушный поток, что объясняется благоприятным воздействием подобной обработки на дислокационную структуру и напряженное состояние изделий.

Из сплавов на основе титана в авиационной технике используют преимущественно высокопрочные титановые сплавы, детали из которых получают операциями горячей обработки давлением, позволяющими избежать дефектов, присущих литым изделиям. Упрочняющая обработка таких сплавов, относящихся к мартенситному классу, состоит из закалки и обеспечивающего повышение прочности и твёрдости искусственного старения. В качестве закалочной среды обычно используется вода, что может привести к неблагоприятному напряженному состоянию, ведущему к деформации и трещинообразованию, особенно для изделий со сложной геометрией поверхности, каковыми являются многие авиационные детали.

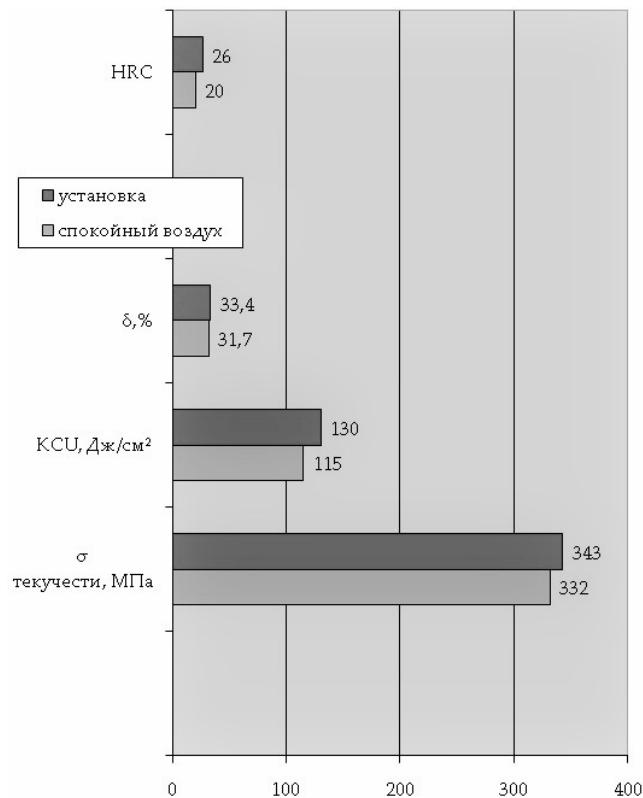


Рис. 1. Сравнительные свойства образцов из стали 40 после стандартной нормализации и экспериментальной обработки

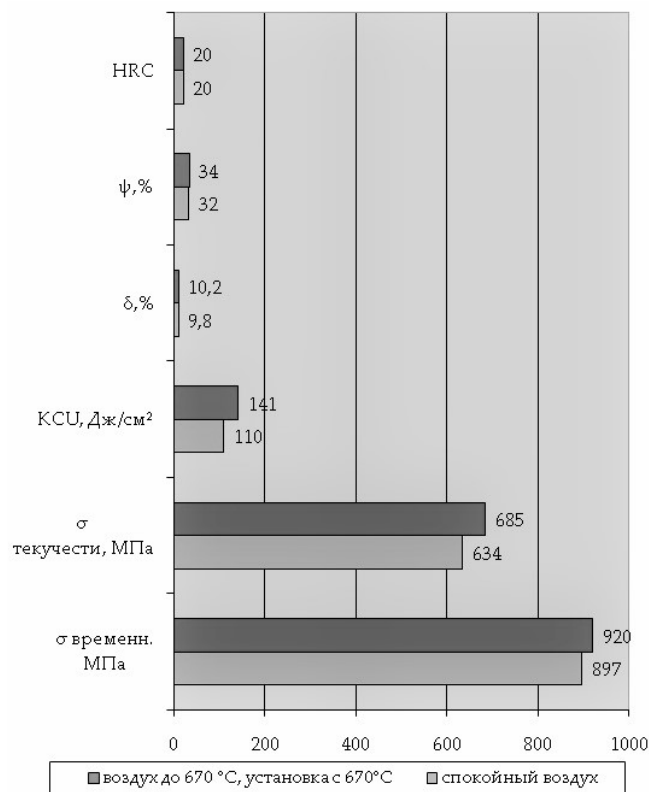


Рис. 2. Сравнительные свойства образцов из стали 40X после стандартной нормализации и экспериментальной обработки

Кроме того, недостаточная стойкость к абразивному износу вследствие недостаточной твёрдости элементов авиационных двигателей из титановых сплавов, таких, как лопатки компрессоров, является серьёзной проблемой и даже незначительное повышение твёрдости в



результате совершенствования технологии термической обработки, в том числе при восстановительном ремонте, представляет значительный интерес с точки зрения возможного увеличения срока службы деталей.

Актуальным является поиск альтернативного способа эффективного закалочного охлаждения, лишенного в то же время перечисленных недостатков.

Исследовалась эффективность применения пульсирующего дозвукового воздушного и водовоздушного потока в качестве закалочной среды при упрочняющей термической обработке титанового  $\alpha + \beta$ -сплава BT14, являющегося на сегодняшний день наиболее прочным в своём классе.

Традиционное термоупрочнение данного сплава состоит из закалки в воду с температуры порядка 870°C и дополнительной выдержки в печи при температуре около 500°C продолжительностью до 16 ч с целью реализации процесса старения.

Столь интенсивное закалочное охлаждение может приводить к деформации и растрескиванию изделий с переменным сечением.

Задачей проведённого исследования было обеспечение термоупрочняемому изделию более высокой твёрдости в сравнении со стандартной термической обработкой, избежав при этом возникновения закалочной деформации и трещин.

Вследствие закалки в структуре данного титанового сплава должна появляться мартенситная  $\alpha''$ -фаза, вызывающая снижение твёрдости.

Закалка осуществлялась как в воде, так и в пульсирующей воздушной и водовоздушной смеси, после чего в закалённых изделиях протекали процессы искусственного старения.

В ходе испытаний установлено, что скорость охлаждения в закалочной установке без подачи воды недостаточна для закалки титанового сплава (твёрдость 32 HRC в результате закалки в воздушном потоке, 30 HRC при закалке в воде, а в итоге старения – 36 и 37 HRC в установке и в воде соответственно). В случае же закалки в пульсирующей водовоздушной смеси при меньшей, чем в воде скорости охлаждения получена твёрдость не выше, чем при закалке в воде и твёрдость после старения 39 HRC против 37 (см. табл. 1 и гистограмму рис. 3).

В результате действия пульсаций воздушного потока на процесс структурного превращения в титановом сплаве образуется более мелкая мартенситная фаза, и соответственно, более дисперсные продукты старения, что и объясняет повышенную твёрдость в сравнении со стандартной термообработкой.

Задача исследования достигается тем, что в ходе термической обработки изделий из двухфазных титановых сплавов путём закалочного нагрева, выдержки и закалочного охлаждения с последующим искусственным старением закалочное охлаждение осуществляли в среде, представляющей собой пульсирующий водовоздушный поток.

Параметры водовоздушного потока, создаваемого газоструйным генератором на основе свистка Гальтона были следующими: скорость воздушного потока до 1 Маха, доминирующая частота колебаний около килогерца, звуковое давление не превышало 100 дБ. Расход охлаждающей жидкости, поступавшей в струю и создававшей пульсирующую двухфазную смесь – до 1,5 л/мин.

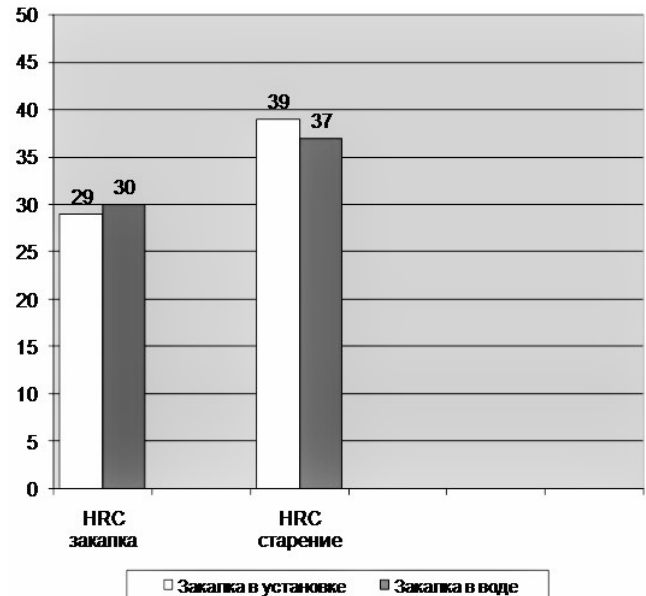


Рис. 3. Свойства титанового сплава BT14 после стандартной закалки в воде с последующим старением и закалки в пульсирующей водовоздушной смеси с последующим старением по стандартному режиму.

Воздействие газовых импульсов на охлаждаемое изделие не только обеспечивает более высокую твёрдость после окончательной термообработки, но и уменьшает закалочную деформацию за счёт релаксации напряжений.

По окончании закалочного охлаждения деталь помещают в печь, где при температуре 500 °C протекает процесс старения, в ходе которого происходит рост твёрдости посредством образования дисперсных частиц  $\alpha$ -фазы, в случае закалки с применением газоимпульсной обработки более значительное по сравнению с традиционной термообработкой

Таблица 1

**Твёрдость титанового сплава BT14 после закалки в воде, пульсирующем воздушном потоке, пульсирующей водовоздушной смеси и последующего искусственного старения**

Закалочная среда	HRC после закалки	HRC после старения
Вода	30	37
Пульсирующий воздушный поток	32	36
Пульсирующая водовоздушная смесь	29	39

Сплавы на основе алюминия широко применяются в качестве конструкционного материала для авиационной техники. Из алюминиевых сплавов изготавливают фюзеляжи воздушных судов, заклепки, детали внутреннего силового набора, литые корпусные конструкции. Все шире используются авиационные материалы на основе спеченных алюминиевых порошков (САП) и слоистый алюмокомпозит.

Из всего разнообразия номенклатуры алюминиевых сплавов для изготовления элементов конструкции воздушных судов наиболее широко используются деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой, как обладающие наибольшей удельной прочностью. К ним относится сплав алюминия, меди, магния, марганца с примесями кремния и железа Д16.

Для данного сплава характерна невысокая пластичность в отожженном состоянии, поэтому формирование изделий из них, а также постановка заклёпок осуществляется преимущественно в первые часы после закалки на высокопластичную однофазную структуру пересыщенного твёрдого раствора. Затем, в ходе естественного старения происходит упрочнение по дисперсионному механизму, за счёт образования многочисленных мелких зон Гинье-Престона, которое сопровождается существенным снижением пластичности.

Закалка Д16 традиционно осуществляется в воду с температуры порядка 500°C. Столь интенсивное охлаждение характеризуется значительным градиентом температур в изделии, особенно длинномерном, сложной формы или имеющем тепловые узлы. Градиент температур может вести к возникновению напряжений и нежелательной деформации, трещинах в переходах от массивных сечений к более тонким без достаточных скруглений.

Поэтому актуальной в процессе термообработки алюминиевых сплавов при изготовлении и восстановительном ремонте, к примеру, закалке заклёпок, является замена воды в качестве закалочной среды на менее резкий охладитель без ущерба для качества закалки. С учетом этого исследовалась возможность замены воды в качестве закалочной среды для алюминиевых сплавов пульсирующим дозвуковым низкочастотным воздушным потоком.

Образцы из сплава Д16 толщиной до 20 мм закаливались в пульсирующем потоке, обладающем скоростью порядка 0,1 Маха при доминирующей частоте пульсаций потока 600 Гц. Уровень звукового давления составлял при этом до 100 дБ.

После старения на воздухе рост твёрдости образцов, закалённых в пульсирующем воздушном потоке на 8 единиц Роквелла выше, чем у закалённых в воде, что связано с более дисперсными зонами Гинье-Престона.

Результаты измерения твёрдости образцов из сплава Д16 после закалки в воду и пульсирующим воздушным потоком соответственно, после естественного старения представлены в виде гистограммы на рис. 4. Более низкая твёрдость после закалки пульсирующим воздухом, в сравнении с закалкой в воде, свидетельствует о более высокой пластичности свежезакалённого алюминиевого сплава, что способно облегчить его деформирование, в том числе при постановке заклёпок.

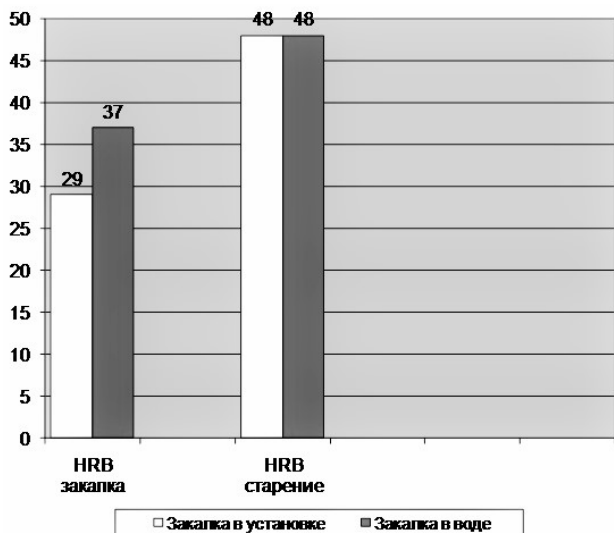


Рис. 4. Твёрдость алюминиевого сплава Д16 после старения

Вывод: Исследования показали высокую эффективность использования при изготовлении и восстановительном ремонте термоупрочняемых элементов конструкции авиационной техники из стали, титановых и алюминиевых сплавов закалочных технологий на основе пульсирующих дозвуковых газовых потоков.

## Литература

1. Kuznetsov Y.A., Kolomeichenko A.V., Goncharenko V.V., Kravchenko I.N. Investigation of Internal Stresses in Thin Layer Oxide Coatings on Aluminum Alloys // *Materials Science Forum*. 2019. V. 968. P. 153-160.
2. Kolomeichenko A. V., Sharifullin S. N., Kuznetsov Yu. A., Logachev V. N., Titov N. V. Increase of the resource of machine parts working by combined methods using plasma electrolytic oxidation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 1058. P. 012074.
3. Tran Q.-P., Kuo Y.-C., Sun J.-K., He J.-L., Chin T.-S. High quality oxide-layers on Al-alloy by micro-arc oxidation using hybrid voltages // *Surf. Coat. Technol*. 2016. V. 303. P. 61-67.
4. Kosenko A., Kolomeichenko A.V., Kuznetsov Yu.A., Titov N.V., Solovyev R.Yu., Sharifullin S. N. Investigation of coating thickness obtained by plasma electrolytic oxidation on aluminium alloys in electrolytes of type "KOH-H3BO3" // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 1058. P. 012065.
5. Filippov A.A., Pachurin G.V., Naumov V.I., Kuzmin N.A. Low-Cost Treatment of Rolled Products Used to Make Long High-Strength Bolts // *Metallurgist*. 2016. Vol. 59. Nos. 9, 10. January. P. 810-815.
6. Smyrnov Y. N., Skliar V. A., Belevitin V. A., Shmyglya R. A., Smyrnov O. Y. Defect Healing in the Axial Zone of Continuous-Cast Billet // *Steel in translation*. V. 46. 2016. P. 325-328.
7. Иванов Д.А. Повышение конструктивной прочности материалов за счёт воздействия пульсирующих дозвуковых низкочастотных газовых потоков. Монография. – СПб.: Изд-во СПбГУЭСЭ, 2008. – 123 с.
8. Патент 2458155 С1 Российская Федерация, (51) МПК С21D 7/04. Способ снятия растягивающих остаточных напряжений на поверхности металлических изделий / Иванов Д.А., Засухин О.Н. заявл. 18.04.11, опубл. 10.08.12, Бюл. №22. – 4 с. : ил.
9. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Влияние условий газовой импульсной обработки на механические свойства сталей // *Двигателестроение*. – 2016. – №4. – С. 30-34.
10. Иванов Д.А. Воздействие нестационарных газовых потоков на структуру и свойства материалов, используемых в авиационной промышленности. Монография. – СПб.: СПбГУГА, 2017. – 328 с.

## Сведения об авторах:

**Иванов Денис Анатольевич** - доцент кафедры Авиационной техники и диагностики. Санкт - Петербургский государственный университет гражданской авиации.

Служебный телефон: 704-18-70.  
E-Mail: ivanov.denis.71@mail.ru.

**Коваленко Геннадий Владимирович** - профессор кафедры Летной эксплуатации и безопасности полетов. Санкт - Петербургский государственный университет гражданской авиации.

Служебный телефон: 704-15-13.  
E-Mail: kgvf@inbox.ru.

Адрес: 196210 Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38.



## ВНИМАНИЮ АВТОРОВ

Научный информационный сборник «ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление» включен в новый ПЕРЕЧЕНЬ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидатов наук, на соискание ученой степени докторов наук (распоряжением Минобрнауки России № 21-р. от 12 февраля 2019 г.)

(Из Перечня ВАК по состоянию на 03.04.2019 года)

(Раздел «Перечень рецензируемых научных изданий (ВАК) mgsu.ru»).

URL: [http://mgsu.ru/science/publikatsionnaya-aktivnost/Perechen\\_VAK\\_03042019\\_specialnosti.pdf](http://mgsu.ru/science/publikatsionnaya-aktivnost/Perechen_VAK_03042019_specialnosti.pdf)

№ п/п	Наименование издания	ISSN	Группы научных специальностей/научные специальности и соответствующие им отрасли науки, по которым присуждаются ученые степени	Дата включения издания в Перечень
1458.	Научный информационный сборник "Транспорт: наука, техника, управление"	0236-1914	05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки), 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки), 05.22.08 – Управление процессами перевозки (технические науки), 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки), 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта (технические науки), 05.22.19 – Эксплуатация водного транспорта, судовождение (технические науки), 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (экономические науки)	с 28.12.2018

В рецензируемом научном информационном сборнике «ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление» редакция традиционно публиковала статьи по группам научных специальностей. Тематика статей включает информационные технологии на транспорте, общие вопросы транспорта, логистику, железнодорожный, автомобильный, внутренний водный, морской, воздушный, трубопроводный, промышленный и городской транспорт, взаимодействие видов транспорта, смешанные перевозки грузов.

При этом следует иметь в виду, что согласно новым правилам в журналах, включенных в Перечень ВАК, для защиты диссертаций будут учитываться только статьи по уточненным научным специальностям, а не по группам специальностей. Поэтому авторам при подготовке статей с целью их последующего учета при защите диссертаций следует особое внимание уделять шифру научного направления и обязательно сверяться с новым Перечнем ВАК.

**Соискателю ученой степени важно знать:** Публикации по другим специальностям, не соответствующим специальности защищаемой диссертации, ВАК засчитывать НЕ будет.

Если статья была опубликована до 28 декабря 2018г. (т.е. до публикации обновленного перечня ВАК), статья будет засчитана.

Разъяснения по новым правилам имеются в сети Интернет. Раздел «Новые правила публикации статей в журналах из перечня ВАК». Например, URL: [originaldissertations.com/newjournals2019.php](http://originaldissertations.com/newjournals2019.php)

# ЭТИЧЕСКИЕ ПРАВИЛА ПУБЛИКАЦИЙ

## ETHICAL RULES OF PUBLICATIONS

1. В настоящих правилах приведены общие принципы этики публикаций, которыми должны руководствоваться в своих взаимоотношениях участники процесса научных публикаций: авторы, рецензенты и редакторы.

2. Этика научных публикаций – это система норм профессионального поведения во взаимоотношениях авторов, рецензентов, редакторов, издателей в процессе создания, распространения и использования научных публикаций.

3. В своей деятельности редактор несет ответственность за обнародование авторских произведений, что накладывает необходимость следования следующим основополагающим принципам:

- При принятии решения о публикации редактор научного журнала руководствуется достоверностью представления данных и научной значимостью рассматриваемой работы.

- Редактор должен оценивать интеллектуальное содержание рукописей вне зависимости от пола, взглядов, гражданства, социального положения и предпочтений авторов.

- Неопубликованные данные, полученные из представленных к рассмотрению рукописей, не должны использоваться для личных целей или передаваться третьим лицам без письменного согласия автора. Информация или идеи, полученные в ходе редактирования и связанные с возможными преимуществами, должны сохраняться конфиденциальными, и не использоваться с целью получения личной выгоды.

- Редактор не должен допускать к публикации информацию, если имеется достаточно оснований полагать, что она является плагиатом.

4. Плагиат – умышленное присвоение авторства чужого произведения науки, чужих идей или изобретений. Плагиат может быть нарушением авторско-правового законодательства и патентного законодательства и в качестве такового может повлечь за собой юридическую ответственность.

5. Для исключения возможного плагиата редактор обязан проверить рукопись статьи с использованием специального программного обеспечения.

6. Редактор не должен оставлять без ответа претензии, касающиеся рассмотренных рукописей или опубликованных материалов, а также при выявлении конфликтной ситуации принимать все необходимые меры для восстановления нарушенных прав.

7. Рецензент осуществляет научную экспертизу авторских материалов, вследствие чего его действия должны носить непредвзятый характер, заключающийся в выполнении следующих принципов:

- Рукопись, полученная для рецензирования, должна рассматриваться как конфиденциальный документ, который нельзя передавать для ознакомления или обсуждения третьим лицам.

- Рецензент обязан давать объективную и аргументированную оценку изложенным результатам исследования. Персональная критика автора неприемлема.

- Неопубликованные данные, полученные из представленных к рассмотрению рукописей, не должны использоваться рецензентом для личных целей.

8. Автор (или коллектив авторов) несет первоначальную ответственность за новизну и достоверность результатов научного исследования, что предполагает соблюдение следующих принципов:

- Авторы статьи должны предоставлять достоверные результаты проведенных исследований. Заведомо ошибочные или сфальсифицированные утверждения неприемлемы.

- Авторы должны гарантировать, что результаты исследования, изложенные в предоставленной рукописи, полностью оригинальны. Заимствованные фрагменты или утверждения должны быть оформлены с обязательным указанием автора и первоисточника. Чрезмерные заимствования, а также плагиат в любых формах, включая неформальные цитаты, перефразирование или присвоение прав на результаты чужих исследований, неэтичны и неприемлемы.

- Необходимо признавать вклад всех лиц, так или иначе повлиявших на ход исследования, в частности, в статью должны быть представлены ссылки на работы, которые имели значение при проведении исследования.

- Авторы не должны предоставлять в журнал рукопись, которая была отправлена в другой журнал и находится на рассмотрении, а также статью, уже опубликованную в другом журнале.

- Соавторами статьи должны быть указаны все лица, внесшие существенный вклад в проведение исследования. Среди соавторов недопустимо указывать лиц, не участвовавших в исследовании и подготовке статьи.

- Если автор обнаружит существенные ошибки или неточности в статье на этапе ее рассмотрения или после ее опубликования, он должен как можно скорее уведомить об этом редакцию журнала.

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ THE INFORMATION FOR AUTORS

### ПРАВИЛА

#### направления, опубликования и рецензирования научных статей

1. К рассмотрению принимаются рукописи, отражающие результаты оригинальных исследований. Содержание рукописи должно относиться к тематике журнала, соответствовать его научному уровню, обладать определенной новизной и представлять интерес для широкого круга читателей журнала.

2. Опубликованные материалы, а также рукописи, находящиеся на рассмотрении в других изданиях, к публикации не принимаются.

3. Редакционная коллегия, а также рецензенты принимают на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи.

4. Рукопись должна содержать постановку задачи, исследование, библиографические ссылки и выводы.

5. К рассмотрению принимаются рукописи объемом не более одного авторского листа (авторский лист содержит 40 тыс. знаков, включая пробелы). Статьи принимаются в распечатанном виде и по электронной почте.

6. **Рукопись статьи должна быть представлена в следующем составе и последовательности:**

- перед названием статьи должно быть указан индекс УДК;

- название статьи на русском языке, под ним – фамилия автора (авторов) с указанием учёной степени, звания, места работы или учёбы;

- название статьи на английском языке, под ним – в латинской транслитерации фамилия автора (авторов) и на английском языке указание учёной степени (например, Doctor (Tech.), Ph. D.(Econ.)), звания (например, Professor, Associate Professor), места работы или учёбы;

- ключевые слова на русском языке, под ними - ключевые слова на английском языке (не менее пяти слов) (курсивом);

- аннотация (краткий реферат) не более 10 строк на русском языке, под ней - аннотация на английском языке (курсивом);

- текст, напечатанный шрифтом Times New Roman, кегль 14, через полтора интервала, в одну колонку, с полями не менее 20 мм, с пронумерованными страницами, с указанием номеров рисунков, рисунками, подрисовочными подписями и необходимыми к ним пояснениями. **Все рисунки должны быть черно-белыми, без оттенков, четко выполненными.** Рукопись не должна содержать более 10 рисунков и 5 таблиц;

- список использованной литературы (библиография) - не менее десяти источников, желательно использование также зарубежных источников;

- сведения об авторах: фамилия, имя и отчество (полностью), ученая степень, звание, должность, место работы и (или) учебы (полностью), адрес учреждения (с почтовым индексом) (домашний адрес не указывается), контактные телефоны (в том числе мобильный), e-mail;

- подписи авторов с указанием даты отправки рукописи.

7. **Рукопись должна быть представлена также на электронном носителе** (в программе Microsoft Word, шрифт Times New Roman, кегль 14, междустрочный интервал 1,5, расположение в одну колонку).

Текст и каждый рисунок должны быть представлены отдельными файлами:

- текста статьи – в формате DOC или RTF, имя файла текста статьи должно состоять из фамилии первого автора в латинской транслитерации (например, Karpuhin.doc)

- рисунки – в одном из форматов: TIFF, JPEG, GIF, EPS. Имя файла каждого рисунка должно состоять из фамилии первого автора в латинской транслитерации, дополненного знаком «подчеркивание» и номером рисунка в статье (например, Karpuhin\_1.tif; Karpuhin\_2.tif и т.д.).

8. При написании математических формул, подготовке графиков, диаграмм, блок-схем не допускается применение размеров шрифтов менее № 8 (за исключением индексов). Таблицы, рисунки и формулы являются частью текста и должны допускать электронное редактирование. Сложные математические формулы должны быть представлены как встроенные в Word объекты Microsoft Equation (Math Type).

9. Ссылки на литературу даются в порядке упоминания; в тексте номер ссылки ставится в квадратные скобки. Список использованных источников приводится в конце рукописи под заглавием «Литература». Библиографические описания в этом списке литературы оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

10. **К рукописи статьи прилагается экспертное заключение** о возможности публикации статьи в открытой печати, заверенное подписью и печатью.

11. Издание осуществляет рецензирование и проверку на антиплагиат всех поступающих в редакцию материалов с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. К рецензированию могут привлекаться члены Редакционной коллегии.

12. Редакция издания направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию сборника соответствующего запроса.

**Рукописи, не соответствующие указанным требованиям, редакцией не рассматриваются.**

13. Все публикации в сборнике бесплатные. Авторские экземпляры научных сборников заказываются за плату.

14. Полные тексты статей сборника публикуются с отставанием на 12 мес. с момента выхода из печати и находятся в свободном доступе на сайте ВИНТИ РАН (Раздел «Издания и продукты»). – URL: <http://www.viniti.ru/products/publications/pub-12187#issues>.

15. Полное содержание журнала и метаданные статей (по мере выхода) находятся в свободном доступе на сайте НЭБ. – URL: <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1367223>

## **ВСЕРОССИЙСКИЙ ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**предлагает научным работникам, аспирантам и другим специалистам в области естественных, точных и технических наук, желающим быстро и эффективно опубликовать результаты своей научной и научно-производственной деятельности, использовать способ публикации своих работ через *систему депонирования*.**

**Депонирование (передача на хранение)** – особый метод публикации научных работ (отдельных статей, обзоров, монографий, сборников научных трудов, материалов научных конференций, симпозиумов, съездов, семинаров), разрешенных в установленном порядке к открытому опубликованию.

Подготовка и передача на депонирование научных работ происходит в соответствии с «Инструкцией о порядке депонирования научных работ по естественным, техническим, социальным и гуманитарным наукам» (М., 2014).

Депонированные научные работы находятся на хранении в депозитарии ВИНТИ РАН, копии работ предоставляются заинтересованным организациям и специалистам на бумажном и электронном носителях и являются официальной публикацией.

Информация о депонированных научных работах включается в информационные издания ВИНТИ РАН: Реферативный журнал, Базу данных и Аннотированный библиографический указатель «Депонированные научные работы».

Направить научную работу на депонирование можно, обратившись в Группу депонирования ЦНИО ВИНТИ РАН по адресу:

**125190, Москва, ул. Усиевича, 20.**

**ВИНТИ РАН, Группа депонирования ЦНИО**

**Тел.: 499-155-43-28, 499-155-43-76, 499-155-42-43, Факс: 499-943-00-60,**

**E-mail: [cnio@viniti.ru](mailto:cnio@viniti.ru), [dep@viniti.ru](mailto:dep@viniti.ru)**

С инструкцией о порядке депонирования можно ознакомиться на сайте ВИНТИ РАН:  
**<http://www.viniti.ru>**