

НАУКА И ТЕХНИКА ТРАНСПОРТА



I S S N 2 0 7 4 - 9 3 2 5



● Транспорт

● Моделирование транспортных процессов

● Безопасность деятельности человека

2023 4

Научно-технический журнал

Входит в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по следующим научным специальностям:

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки);
- 2.1.16. Охрана труда (технические науки);
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки);
- 2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки);
- 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки);
- 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки);
- 2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки);
- 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы (технические науки).

Адрес редакции:

125315, Москва, Часовая ул., 22/2
Тел.: 8 (495) 649-19-00 доб. 385.
125315, Chasovaya Str., 22/2, Russia, Moscow
Tel.: 8 (495) 649-19-00 ext: 385. Fax: 8 (499) 151-18-37

E-mail: nttmag@rgotups.ru,
<http://ntt.rgotups.ru>

Подписной индекс
в каталоге агентства «Урал-Пресс» — 69960.

Издатель: РУТ (МИИТ)
Тел.: 8 (495) 649-19-00 доб. 385.
Журнал выходит 4 раза в год.
Свидетельство о регистрации выдано Роскомнадзором
ПИ №ФС77-82472 от 10 декабря 2021 г.
Выходит с 2002 года.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Редакция не несет ответственности за представленные материалы. Мнение редакции может не совпадать с мнением автора. Рукописи рецензируются и не возвращаются. Использованы фотоматериалы из открытых источников.

Отпечатано РОАТ РУТ (МИИТ):
125315, Москва, 3-й Балтийский пер, д.4, к.5

Подписано в печать 15.12.2023.

Усл. печ. л. 14
Формат 60×90^{1/8}.

Тираж 60 экз.
Тип. зак. 25

© Наука и техника транспорта, 2023



Редакционный совет:

д-р техн. наук, проф. Апатцев В.И. — председатель;
д-р техн. наук, проф. Бугреев В.А. — зам.председателя;
д-р техн. наук, проф. Горелик А.В.;
д-р техн. наук, проф. Космодамианский А.С.;
д-р техн. наук, проф. Безродный Б.Ф.;
д-р техн. наук, проф. Никитин А.Б.;
д-р ф.-м. наук, проф. Локтев А.А.;
д-р техн. наук, доц. Сычев В.П.;
д-р техн. наук, проф. Мондрус В.Л.;
д-р техн. наук, проф. Мкртычев О.В.;
д-р техн. наук, проф. Аксенов В.А.;
д-р техн. наук, проф. Шварцбург Л.Э.;
д-р техн. наук, проф. Николайкин Н.И.;
д-р техн. наук, проф. Сидоренко В.Г.;
д-р техн. наук, проф. Осьминин А.Т.;
д-р экон. наук, проф. Шкурина Л.В.;
д-р экон. наук, проф. Мирошниченко О.Ф.;
д-р экон. наук, проф. Белоусова Н.И.

Главный редактор
В.И. Апатцев

Ответственный редактор

В.А. Бугреев

Ответственный секретарь

В.А. Кочнев

Редакторы

Д.Н. Тихонычев, В.К. Тихонычева

Английский перевод

М.Л. Окулова

4' 2023

Транспорт



Ю.О. Пазойский, Р.Р. Гусейнов

Математическая модель задачи оптимизации размещения железнодорожных станций с контейнерным терминалом для погрузки-выгрузки твердых коммунальных отходов

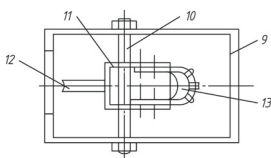
8



М.Н. Торопов

Основные проблемы систем водотеплоснабжения в транспортном комплексе

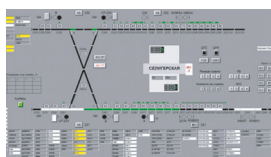
17



Х.А. Дианов

Стенд для исследования резания грунтов моделями рабочих органов землеройных машин

27



В.Г. Новиков, Л.Н. Логинова

Повышение пропускной способности участков метрополитена за счет применения цифрового радиоканала и инфракрасного канала передачи данных

30



В.А. Бугреев, С.Б. Мухамбетов, А.П. Чехов, Е.В. Новиков

Оптимизация электропотребления на железнодорожном транспорте в условиях ограничений

37



Д.Г. Евсеев, С.В. Лагутин

Метод определения статистических данных для расчета остаточного ресурса пассажирского вагона

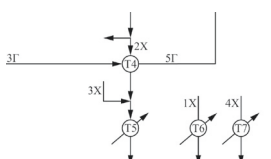
45



А.А. Локтев, А.В. Сычева, В.П. Сычев

Влияние напряжений в рельсе железнодорожного пути на волновые процессы от воздействия на него колеса

48



Е.Н. Пирогов, Е.В. Драбкина, Н.В. Коваленко

Синтез теплообменной системы промышленного производства

54



А.С. Шумский, Г.М. Биленко, С.Н. Шмаль, С.П. Шумский

Адаптация железнодорожной инфраструктуры центрального транспортного узла для обеспечения эффективной организации местной работы

61



П.С. Григорьев, С.В. Беспалько, С.Н. Коржин, Ш.Р. Ибодуллоев

Определение продольной силы, действующей на оболочку котла безрамной цистерны при столкновении с жестким препятствием

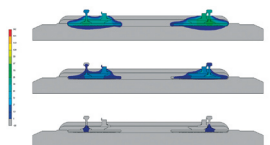
69



Д.Ю. Потапова, Н.А. Постоева

Перспективы развития региональной инфраструктуры речного транспорта

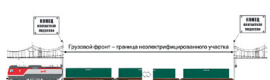
76



В.В. Королев

Методы расчета систем, обеспечивающих работу стрелочных переводов в условиях низких температур

81

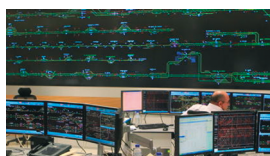


С.П. Вакуленко, А.М. Насыбуллин, Л.Р. Айсина

Разработка технологии подачи состава грузового поезда, ведомого электровозом, на погрузочно-выгрузочный путь при частичном отказе от контактной сети в пределах грузового фронта

88

Моделирование транспортных процессов



В.Г. Сидоренко, Е.В. Копылова, М.А. Туманов

Проблемы и перспективы создания интеллектуальных систем управления технологическими процессами на линейных объектах пассажирского комплекса железнодорожного транспорта

95

Безопасность деятельности человека



Л.А. Леванчук, О.И. Копытенкова, М.Ф. Вильк, О.С. Сачкова, В.А. Кочнев

Определение экономической эффективности при снижении уровня заболеваемости работников локомотивных бригад тепловозов на основе использования методологии оценки риска

101



А.А. Демидов, А.В. Матешева, В.А. Пашинин

Повышение эффективности очистки сточных вод предприятий транспортной отрасли

105



В.В. Самойлов

Целесообразность использования биологического способа пылеподавления на железнодорожном транспорте при перевозке сыпучих грузов

109

Transport

Yu.O. Pazoysky, R.R. Guseynov

Mathematical Model of Location Optimisation Problem of Railway Stations with Piggyback Terminal for Loading and Unloading Solid Municipal Waste **8**

The article analyses the situation with the municipal solid waste operation in Moscow and determines the practicability of using railway transport for their export to distant landfills. The criteria optimisation problem of the location of railway stations with the piggyback terminal for loading and unloading waste have been formed, the objective function of this problem has been formulated, and its solution has been given.

Key words: railway stations, piggyback terminal, loading and unloading of municipal solid waste

M.N. Toropov

Key Problems of Water and Heat Supply Systems in Transport Complex **17**

The author analyses the key problems of water supply, traditional ways to solve them and the expediency of developing a new approach to eliminating negative factors.

Key words: low quality of pipes, high degree of wear, secondary water pollution, biocorrosion, depolarisation of electrochemical corrosion, corrosion rate

Kh. A. Dianov

Stand for Soil Cutting Research with Models of Excavating Machine Working Tools. **27**

The article describes the universal stand for studying soil cutting with models of excavating machine working tools (patent for invention No. 2689958). The stand makes it possible to conduct soil cutting studies in three media: in a normal medium (at atmospheric pressure), an aqueous medium (at hydrostatic pressure) and in a rarefied space (vacuum). At the same time, it is possible to conduct studies with translational cutting elements (models of dumps, cable-laying cutting knives, etc.) and rotary working elements (excavator bucket, grab).

Key words: stand, universal, vacuum, hydrostatic pressure

V.G. Novikov, L.N. Loginova

Increasing of Metro Section Capacity due to Use of Digital Radio Channel and Infrared Data Transmission Channel **30**

To improve the quality of the Moscow Metro operation, the significant attention is paid to ensuring the train traffic safety, improving the metro section capacity indicators, as well as the effectiveness of the use of technical means.

Key words: Moscow Metro, dispatching centralisation, train traffic safety, capacity

V.A. Bugreev, S.B. Mukhambetov, A.P. Chekhov, E.V. Novikov

Optimisation of Power Consumption in Railway Transport under Restriction Conditions **37**

The optimisation model type and the solution form are justified taking into account the specifics of power consumption in railway transport. The initially formulated problem of nonlinear programming is reduced to linear. The result of its solution is obtained in the form of a load profile of the selected control object for working and non-working time intervals.

Key words: inverse problem, linear programming, control action, power consumption, optimisation

D.G. Evseev, S.V. Lagutin

Method of Determining Statistical Data for Calculation of Passenger Car Remaining Life **45**

When finding the remaining service life of the product the main task, in addition to the failure function definition, is to determine the initial data for calculation. So, it is not always possible to find the necessary parameters due to the multifactorial destruction of the product and the lack of necessary research in this field. The paper considers an alternative method of input data definition for elements with a reliability model using Rayleigh distribution.

Key words: passenger car, comfort system, repair, maintenance, elimination

A.A. Loktev, A.V. Sycheva, V.P. Sychev

Impact of Stresses in Track Rail on Wave Processes from Wheel Impact on it **48**

The authors consider the interaction of the wheel and rail as a solution to the problem of spherical wheel impact to the rail mainly in the joint zone represented by an orthotropic plate having curvilinear anisotropy, which is affected by a longitudinal force and impact effects in two moments. The diagrams of impact interaction of wheel and rail in the form of Uflyand-Mindlin plate and solution of system of differential equations are given.

Key words: wheel, rail, stresses, impact, anisotropy, Uflyand-Mindlin plates

E.N. Pirogov, E.V. Drabkina, N.V. Kovalenko

Synthesis of Industrial Heat Exchange System **54**

The article considers the thermodynamic method of constructing thermal production circuits. This method is especially relevant for heat-consuming industries, in which open steam is used as heat carriers. The feasibility of involving low-potential heat sources in the implementation of technological processes is shown.

Key words: thermal circuit, low-potential heat, c, heat exchanger, acute steam, heat recovery

A.S. Shumsky, G.M. Bilenko, S.N. Shmal, S.P. Shumsky

Adaptation of Railway Infrastructure of Central Transport Hub to Ensure Efficient Local Operation Organisation **61**

The article indicates the need for a specialised marshalling station in the Central Transport Hub for the formation of local freight trains. To determine the potentially advantageous location of such a station in the junction, the authors propose to use the Dijkstra's algorithm.

Key words: central transport hub, Dijkstra's algorithm, location of local train formation station

P.S. Grigoriev, S.V. Beshpal'ko, S.N. Korzhin, S.R. Ibodulloyev

Determination of Longitudinal Force Acting on Boiler Shell of Frameless Tank in Collision with Rigid Obstacle **69**

The determination of the longitudinal force acting on the boiler shell of the tank car in a collision with an obstacle is investigated. The decision takes into account the law of conservation of energy and the potential energy associated with deformation of the shell, the theory of shells being applied. The article presents the graphs of force change as a function of collision velocity. The authors investigated the change of the force before and after the moment of saturation of the energy intensity of the device, taking into account the energy of the shell deformation.

Key words: railway tank, frameless tank, rigid obstacle, shell theory, energy conservation law

D.Yu. Potapova, N.A. Postoeva

Development Prospects of Regional River Transport Infrastructure **76**

The purpose of the study presented in the article is to consider methods for determining the location of a transport and logistics facility in a certain region. The analysis allows stating that to solve this problem, it is necessary to check individual options for a number of factors and take into account the individual characteristics of the region.

Key words: political situation, economic sector, industry, transport infrastructure

V.V. Korolev

Calculation Methods of Systems Ensuring Turnout Operation in Conditions of Low Temperatures **81**

The article analyses some of the parameters describing the thermal state of the turnouts, using the example of solving two problems with an applied orientation: defrosting a turnout covered with snow and maintaining a warm state in conditions of intense snowfall. As a result of the series of calculations, influencing parameters of the tasks were established, the conservative assessment methods were proposed, practical techniques for simplifying the computational part of the tasks were developed, methods for calculating each of the tasks were proposed, which can be further supplemented during the development of the issue.

Key words: turnout, heat distribution, snow engineering science, snow, heating

S.P. Vakulenko, A.M. Nasybullin, L.R. Aysina

Development of Technology for Feeding Freight Train Driven by Electric Locomotive to Loading and Unloading Track in Case of Partial Failure of Contact Network within Freight Front

88

The authors propose a new approach for feeding trains driven by an electric locomotive to loading and unloading tracks by cars forward without switching to shunting order of movement. To reduce the duration of train processing, it is recommended to use a remote the video control device installed on the tail car of the train.

Key words: movement of cars forward, video control system, remote control

Modelling of transport processes

V.G. Sidorenko, E.V. Kopylova, M.A. Tumanov

Problems and Prospects of Creation of Intelligent Process Operation Systems at Linear Facilities of the Railway Passenger Complex

95

The article deals with the current issues of operation of long-distance passenger transportation by rail. The need to use the intelligent control systems is shown not only when organising the passenger train operation, but also when preparing trains for a route. One of the optimisation tasks that need to be solved within the framework of the operation of such an intelligent control system has been set.

Key words: passenger transportation, intelligent operation systems, technological processes, punctuality

Safety of human activity

L.A. Levanchuk, O.I. Kopytenkova, M.F. Wilk, O.S. Sachkova, V.A. Kochnev

Determination of Economic Efficiency in Reducing Incidence Rate

of Diesel Locomotive Crew Workers Based on Use of Risk Assessment Methodology

101

Workers of locomotive crews operating diesel locomotives are exposed to the chemical air pollution of the working area. Some of the pollutants are carcinogenic. When operating on the long-term diesel locomotives, the carcinogenic risk is $5.22 \cdot 10^{-3}$. It is expected that the formation of 52 additional cases of carcinogenic pathology per 10,000 workers will be annually.

Key words: locomotive crew workers, working area air, carcinogenic risk, economic costs

A.A. Demidov, A.V. Matesheva, V.A. Pashinin

Treatment Efficiency Improving of Wastewater of Transport Industry Enterprises

105

The article is devoted to the issue of wastewater treatment of transport enterprises from organic selenium compounds. The adsorption of DAFS-25 from ethyl alcohol on NaX zeolite, MSC silica gel and Ca (CH₃COO)₂ adsorbent was investigated. It has been established that previously methods of treating wastewater from selenium-containing compounds were not used in the transport industry. The use of the adsorption method described above seems to be an effective solution to this problem.

Key words: adsorption, DAFS-25, silica gel, Gibbs excess method, pollution of water bodies, wastewater

V.V. Samoilov

Expediency of Using Biological Method of Dust Suppression in Railway Transport when Transporting Bulk Cargo

109

The paper considers the modern methods of coal dust combating; the relevance of this issue is proved. The author hives the arguments are made that the modern methods of dust control are ineffective and a new method of dust suppression is needed, which can comprehensively solve this problem. To solve the issue of dust suppression, it is proposed to use a biological preparation.

Key words: coal, dust suppression, transportation, loading and unloading operations, coal storage, bulk cargo

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ С КОНТРЕЙЛЕРНЫМ ТЕРМИНАЛОМ ДЛЯ ПОГРУЗКИ-ВЫГРУЗКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ



Ю.О. Пазойский



Р.Р. Гусейнов

В статье проанализирована ситуация с обращением твердых коммунальных отходов в г. Москве и определена целесообразность использования железнодорожного транспорта для их вывоза на удаленные полигоны. Сформированы критерии оптимизации задачи размещения железнодорожных станций с контейнерным терминалом для погрузки-выгрузки отходов, сформулирована целевая функция данной задачи и приведено ее решение.

Ключевые слова: железнодорожные станции, контейнерный терминал, погрузка-выгрузка твердых коммунальных отходов

EDN: AAQJWN

Наблюдающийся в настоящее время рост численности населения крупнейших мегаполисов Российской Федерации, в первую очередь Москвы, Санкт-Петербурга и Сочи, привел к росту объема производимых в этих городах твердых коммунальных отходов (ТКО), в связи с чем возникла проблема их захоронения из-за недостаточной мощности ближайших действующих полигонов для их размещения, а строительство новых полигонов затруднено в следствие отсутствия близлежащих земельных участков требуемой площади с соответствующими требованиям экологического законодательства Российской Федерации грунтами и по прочим причинам.

К примеру, согласно данным Территориальной схемы обращения с отходами г. Москвы [3], рост образования ТКО ожидается с 6,789 млн т в 2023

году до 6,843 млн т в 2031 году. Прогнозные объемы размещения отходов на полигонах составляют 5,292 млн т в 2023 году и 5,341 млн т в 2031 году.

В настоящее время на территории г. Москвы отсутствуют действующие полигоны размещения ТКО, внесенные в государственный реестр объектов размещения отходов (ГРОРО).

Поэтому все образующиеся в Москве ТКО вывозятся на полигоны в ближайшие области. Однако основной объем ТКО размещается на полигонах Подмоскovie.

Помимо ТКО из Москвы, на подмосковных объектах также принимаются и перерабатываются ТКО, производимые в Московской области ТКО, объем которых согласно Территориальной схемы обращения с отходами Московской области [4] составляет 4,07 млн т.

Пазойский Юрий Ошарович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Железнодорожные станции и транспортные узлы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), почетный работник транспорта Российской Федерации, почетный железнодорожник. Область научных интересов: пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте, совершенствование работы станционных процессов. Автор более 150 научных работ, в том числе четыре учебника и пять монографий. Имеет три патента на изобретения.

Гусейнов Рамис Расим оглы, аспирант кафедры «Железнодорожные станции и транспортные узлы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), советник Генерального директора ООО «ДД-Групп». Область научных интересов: железнодорожный транспорт. Автор 24 научных работ.

Следовательно, суммарный объем ТКО, ежегодно направляемый на обработку, утилизацию, размещение и хранение на объектах обработки отходов Московской области, может достигать 10 млн т.

При существующих объемах ТКО, поступающих из Москвы и Московской области, мощности действующих комплексов по переработке отходов и полигонов Московской области, с учетом их текущей загрузки, хватит для размещения последних еще лет на пять.

При этом уже сейчас расстояние транспортировки ТКО из мест его накопления в Москве до региональных объектов обработки отходов достигает 250 км.

Таким образом, в ближайшей перспективе возникнет необходимость транспортировки отходов на удаленные полигоны. Для осуществления последней более эффективным будет железнодорожный транспорт по сравнению с традиционным для этого вида деятельности автомобильным, по причине наличия развитой сети железнодорожных станций и подвижного состава, что обеспечит погрузку, выгрузку и транспортировку расчетного объема ТКО.

По результатам выполненного многокритериального анализа экологической, экономической, и технико-технологической составляющих процесса перевозки ТКО железнодорожным транспортом, включающим сравнение вариантов организации перевозки отходов в полувагонах, крытых вагонах, универсальных контейнерах, съемных автомобильных кузовов и автопоездах на железнодорожных платформах, рациональным является применение контейнерной технологии транспортировки ТКО с использованием съемных автомобильных кузовов.

Как следствие, для организации массового вывоза ТКО из крупнейших мегаполисов Российской Федерации на удаленные полигоны размещения отходов необходимо создание сети станций с контейнерным терминалом.

Задача создания сети железнодорожных станций с контейнерным терминалом для погрузки-выгрузки ТКО требует обязательного предварительного технико-экономического обоснования. При этом в качестве методической основы такого обоснования целесообразно использовать математический аппарат, поскольку сложность рассматриваемой задачи исключает возможность ее решения на основе эвристических подходов [1].

Рассмотрим задачу о создании сети железнодорожных станций с контейнерным терминалом как задачу математического программирования. Для этого опишем ее предметную область в определениях теории множеств, после чего будут формализованы критерии оптимизации и ограничения, которым должно удовлетворять решение задачи [5].

Пусть выделено множество, состоящее из n железнодорожных станций различного типа, на которых возможно размещение контейнерного терминала для погрузки-выгрузки ТКО.

Данное множество будет обозначено как $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, где x_i — элемент множества X , имеющий номер i , $i = 1, n$.

Допустим, что создаваемая сеть должна состоять из m терминалов ($m \leq n$), тогда множество станций, на которых целесообразно разместить контейнерные терминалы, есть $X^* = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, $X^* \subseteq X$. Следовательно, исследуемая задача сводится к задаче рационального выбора m элементов из n [2].

Пусть также на множество станций X задан линейный порядок, при котором любая станция, входящая в данное множество, задана единственным образом своим параметром — номером i , который она имеет.

Решение такой задачи будет описано с помощью характеристической функции множества X : $\chi(X)$. Данная функция представляет собой вектор длины n , компоненты которого являются элементами Булева множества $B = \{0; 1\}$. Каждому элементу множества X с номером i соответствует компонента вектора $\chi(X)$ с тем же номером, при этом значение данной компоненты определяется по следующему правилу:

$$\chi_i = \begin{cases} 0, & \text{если станция } x_i \text{ не включена в сеть станций;} \\ 1, & \text{если станция } x_i \text{ включена в сеть станций.} \end{cases}$$

Так как исследуемая задача является задачей выбора m станций из n , то с учетом введенных обозначений, ее решением будет вектор, m — компонент которого равны 1, а $(n - m)$ — компонент равны 0. Далее будем обозначать данный вектор как χ .

В целях формализации критериев оптимизации, а также технических и экономических ограничений, которым должно удовлетворять искомое решение, принимаем, что для каждой станции x_i из множества X известны значения следующих технико-экономических параметров железнодорожных станций с контейнерным терминалом для погрузки-выгрузки ТКО (в случае их размещения на станции x_i) [1]:

- капитальные затраты на строительство новых или реконструкцию существующих станционных путей (приемо-отправочных и погрузочно-разгрузочных), оснащение функциональных зон контейнерного терминала, приобретение требуемого количества средств механизации для обработки на станции x_i поступающих объемов ТКО, Z_i^k ;

- дополнительные среднегодовые эксплуатационные затраты на обслуживание устройств контейнерного терминала погрузки-выгрузки ТКО на станции x_i , ΔZ_i^9 ;

- дополнительные среднегодовые эксплуатационные затраты на автомобильную перевозку ТКО «первой/последней мили» до станции x_i , ΔZ_i^a ;

- дополнительные среднегодовые доходы от оплаты железнодорожного тарифа за перевозку ТКО железнодорожным транспортом с использованием контейнерной технологии, а также от эксплуатации контейнерного терминала погрузки/выгрузки ТКО при размещении его на станции x_i , ΔD_i ;

- максимальная годовая перерабатывающая способность станции x_i с контейнерным терминалом погрузки/выгрузки ТКО, $P_i^{\max}$.

Значение Z_i^k зависит от наличия и длины существующих приемо-отправочных железнодорожных путей, наличия и состояния погрузочно-разгрузочных механизмов, площади и текущего уровня развития станционных погрузочно-разгрузочных площадок для обработки контейнерных поездов с ТКО на станции x_i . При этом целесообразно выделить три основных варианта:

- длина и количество существующих на станции путей (приемо-отправочных и погрузочно-выгрузочных), количество и состояние существующих средств механизации, площадь и оснащение имеющихся на станции x_i грузовых площадок достаточны для переработки планируемых объемов контейнерных поездов с ТКО;

- для обработки планируемых объемов контейнерных поездов с ТКО необходимо частичное удлинение существующих приемо-отправочных и погрузочно-выгрузочных путей, ремонт имеющихся погрузочно-разгрузочных механизмов, модернизация грузовой площадки станции x_i ;

- для обработки планируемых объемов контейнерных поездов с ТКО на станции x_i необходимо строительство новых дополнительных приемо-отправочных и погрузочно-выгрузочных путей, приобретение новых требуемых средств механизации, капитальная реконструкция грузовой площадки.

При первом варианте длина и количество существующих приемо-отправочных и погрузочно-выгрузочных путей, количество и состояние существующих средств механизации, площадь и оснащение имеющихся на станции x_i грузовых площадок сразу позволяют обрабатывать контейнерные поезда, поэтому $Z_i^k = 0$, в остальных вариантах, следовательно, $Z_i^k > 0$.

Критерии оптимизации и ограничения задачи

По результатам анализа представленных независимых технико-экономических параметров зададим

четыре критерия оптимизации выбора станции для создания на ней контейнерного терминала погрузки-выгрузки ТКО:

- минимум капиталовложений (Z_i^k) на укладку новых или реконструкцию существующих приемо-отправочных [2] и погрузочно-разгрузочных путей, приобретение дополнительных средств механизации, подготовку грузовых площадок на станции x_i :

$$Z_i^k \rightarrow \min;$$

- минимум дополнительных среднегодовых эксплуатационных расходов (ΔZ^3) при создании на станции x_i контейнерного терминала погрузки-выгрузки ТКО, включающих расходы на выполнение погрузочно-разгрузочных и начально-конечных операций со съемными автомобильными кузовами:

$$\Delta Z^3 \rightarrow \min;$$

- минимум дополнительных среднегодовых эксплуатационных расходов на автомобильную перевозку ТКО «первой/последней мили» до станции x_i [1]:

$$\Delta Z^a \rightarrow \min;$$

- максимум дополнительных среднегодовых доходов ΔD_i от оплаты железнодорожного тарифа на перевозку ТКО контейнерными поездами и от выполнения на станции x_i погрузочно-разгрузочных работ со съемными кузовами при перевозке в них ТКО:

$$\Delta D_i \rightarrow \max.$$

Приведенные критерии оптимизации заменим одним обобщенным критерием, выполнив их свертку. Для этого введем функцию $C = C(Z^k, \Delta Z^3, \Delta Z^a, \Delta D)$, значение которой суть [2]

$$C_i = Z_i^k + \Delta Z_i^3 + \Delta Z_i^a - \Delta D_i.$$

Так как справедливо соотношение

$$((Z_i^k \rightarrow \min), (\Delta Z_i^3 \rightarrow \min), (\Delta Z_i^a \rightarrow \min), (\Delta D_i \rightarrow \max)) \Rightarrow ((Z_i^k + \Delta Z_i^3 + \Delta Z_i^a - \Delta D_i) \rightarrow \min),$$

то обобщенный критерий оптимизации решения исследуемой задачи есть

$$C_i \rightarrow \min.$$

Поскольку значения параметров Z_i^k , ΔZ_i^3 , ΔZ_i^a , и ΔD_i согласно условию заданы, то и значение функции C_i может быть вычислено для любой станции x_i из множества X .

Учитывая введенные обозначения целевая функция исследуемой задачи о создании сети железнодорожных станций с контейнерными терминалами для погрузки-выгрузки ТКО может быть записана как

$$F(\chi) = \bar{C} \cdot \chi = \sum_{i=1}^n C_i \cdot \chi_i,$$

где $\bar{C}$ — вектор значений функции C [2].

Решением рассматриваемой задачи будет вектор χ , для которого значение функции F будет минимальным.

Решение исследуемой задачи должно удовлетворять трем ограничениям.

1. Максимальная годовая перерабатывающая способность станции с контрейлерным терминалом для погрузки-выгрузки ТКО должна обеспечивать переработку планируемого объема ТКО (P^n) [2]:

$$\sum_{i=1}^m P_i^{\max} \geq P.$$

2. Максимально допустимое расстояние между железнодорожной станцией отправления и станцией назначения контрейлерных поездов с ТКО определяется размером железнодорожного тарифа на такую перевозку. Суммарный объем уплаченного железнодорожного тарифа за перевозку планируемого объема ТКО (P^n) должен быть не больше суммарной стоимости автомобильной перевозки планируемого объема ТКО от мест обработки ТКО до мест размещения на полигонах. С учетом принятых формализованных критериев оптимизации данное ограничение имеет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^m r_{\text{перевозка}}^{\text{ЖД}} \leq P^n \cdot (r_{\text{тариф}}^{\text{Единый}} - (3_i^{\text{э}} + 3_i^{\text{а}} + C_{\text{ТКО}}^{\text{Обработки}} + r_{\text{ТКО}}^{\text{Размещения}})),$$

где $r_{\text{перевозка}}^{\text{ЖД}}$ — железнодорожный тариф на перевозку ТКО в составе контрейлерного поезда;

$r_{\text{тариф}}^{\text{Единый}}$ — единый тариф на услуги регионального оператора по обращению с ТКО, включающий в себя расходы на сбор, транспортирование, обработку, захоронение ТКО;

$3_i^{\text{э}}$ — эксплуатационные расходы на погрузочно-разгрузочные и начально-конечные операции со съемными автомобильными кузовами с ТКО;

$3_i^{\text{а}}$ — эксплуатационные расходы на автомобильную перевозку ТКО «первой/последней мили»;

$C_{\text{ТКО}}^{\text{Обработки}}$ — стоимость обработки ТКО на мусороперегрузочных, мусоросортировочных комплексах или иных объектах обращения с ТКО;

$r_{\text{ТКО}}^{\text{Размещения}}$ — тариф размещения ТКО на полигоне размещения отходов.

При этом максимальное удаление железнодорожной станции отправления контрейлерных поездов с ТКО от объекта обработки поступающих ТКО и максимальное удаление станции назначения контрейлерных поездов с ТКО от полигона размещения отходов должны соответствовать следующим условиям:

$$L \leq \frac{Q(f_T - \pi_T)}{r_T},$$

где L — расстояние перевозки ТКО «последней мили»; Q — масса груза; f_T — норма доходности; π_T — норма прибыли; r_T — тариф на автомобильную перевозку ТКО [6].

3. Количество контрейлерных терминалов погрузки-выгрузки ТКО на создаваемой сети должно соответствовать плановому значению — m .

Учитывая введенные обозначения, первое из приведенных ограничений будет представлено в виде:

$$\sum_{i=1}^n P_i^{\max} \cdot \chi_i \geq P^n.$$

Второе в виде:

$$\sum_{i=1}^n r_{\text{перевозка}}^{\text{ЖД}} \cdot (\chi_i - 1) \leq P^n \cdot (r_{\text{тариф}}^{\text{Единый}} - (3_{\chi_i}^{\text{э}} + 3_{\chi_i}^{\text{а}} + C_{\text{ТКО}}^{\text{Обработки}} + r_{\text{ТКО}}^{\text{Размещения}})).$$

Третье в виде:

$$\sum_{i=1}^n \chi_i = m.$$

Поскольку согласно определению все компоненты вектора χ являются элементами Булева множества $B=\{0; 1\}$, то еще одним ограничением рассматриваемой задачи является следующее:

$$\chi_i \in \{0; 1\}, \forall i = \overline{1, n}.$$

На основании приведенной формализации задачи о создании сети железнодорожных станций с контроллерным терминалом погрузки-выгрузки ТКО возможна интерпретация ее как задачи линейного целочисленного программирования с Булевыми переменными [6] и описание ее математической постановки.

Математическая постановка задачи

На основании введенных критериев оптимизации и принятых ограничений исследуемая задача будет иметь следующую математическую постановку:

$$\left\{ \begin{array}{l} F(\chi) = \sum_{i=1}^n C_i \cdot \chi_i \mapsto \min \\ \sum_{i=1}^n P_i^{\max} \cdot \chi_i \geq P^{\Pi} \\ \sum_{i=1}^n r_i^{\text{ЖД перевозка}} \cdot (\chi_i - 1) \leq P^{\Pi} \cdot (r^{\text{Единый тариф}} - (3^{\text{тэ}}_{\chi_i} + 3^{\text{та}}_{\chi_i} + C^{\text{Обработки ТКО}} + r^{\text{Размещения ТКО}})) \\ \sum_{i=1}^n \chi_i = m \\ \chi_i \in \{0; 1\}, \forall i = \overline{1, n} \end{array} \right.$$

Рассматриваемая задача является двумерным аналогом известной в дискретном программировании «задачи о ранце», которая формулируется следующим образом.

Пусть имеется n предметов, ценность каждого из которых есть c_i , а вес — a_i , $i = \overline{1, n}$. Имеется и ранец грузоподъемностью R . Значение R таково, что не все предметы можно положить в ранец, следовательно, задано ограничение

$$\sum_{i=1}^n a_i \geq R.$$

Необходимо положить в ранец предметы, имеющие максимальную суммарную ценность.

Введем n булевых переменных, значения которых определяются по правилу:

$$\chi_i = \begin{cases} 1, & \text{если предмет с номером } i \text{ кладется в ранец} \\ 0, & \text{если предмет с номером } i \text{ не кладется в ранец} \end{cases}, \forall i = \overline{1, n}.$$

Тогда математическая постановка этой задачи имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n c_i \cdot \chi_i \mapsto \max \\ \sum_{i=1}^n a_i \cdot \chi_i \leq R \\ \chi_i \in \{0; 1\}, \forall i = \overline{1, n} \end{array} \right.$$

В общем (многомерном) случае, когда помимо ценности предмета c рассматриваются еще k его свойств, которым соответствуют k ограничений, математическая постановка этой же задачи есть:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n c_i \cdot \chi_i \mapsto \max \\ \sum_{i=1}^n a_{ji} \cdot \chi_i \leq b_j, \forall j = \overline{1, k} \\ \chi_i \in \{0; 1\}, \forall i = \overline{1, n} \end{array} \right.$$

С учетом наличия аналогии «задачи о ранце» с задачей о создании сети станций с контрейлерным терминалом погрузки-выгрузки ТКО, необходимо отметить, что решение последней может быть получено на основе методов, разработанных для решения классической «задачи о ранце». Но для этого математическая постановка рассматриваемой задачи должна быть сведена к математической постановке «задачи о ранце». Поэтому необходимо перейти от задачи на отыскание минимума к задаче на отыскание максимума, введя новые переменные.

Пусть

$$\begin{aligned} b_{i1} &= -P_i^{\max}, \\ R_1 &= -P^{\Pi}, \\ b_{i2} &= r_i^{\text{ЖД перевозка}}, \\ R_2 &= P^{\Pi} \cdot (r^{\text{Единый тариф}} - (3_{\chi_i}^{\text{'э}} + 3_{\chi_i}^{\text{'а}} + C^{\text{Обработки ТКО}} + r^{\text{Размещения ТКО}})) \end{aligned}$$

Следовательно, обобщенный критерий оптимизации есть

$$c_i \rightarrow \max,$$

а целевая функция рассматриваемой задачи примет вид:

$$F(\chi) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \chi_i.$$

При этом ограничение

$$\sum_{i=1}^n P_i^{\max} \cdot \chi_i \geq P^{\Pi}$$

преобразуется к виду

$$\sum_{i=1}^n b_{i1} \cdot \chi_i \leq R_1,$$

а ограничение

$$\sum_{i=1}^n r_i^{\text{ЖД перевозка}} \cdot (\chi_i - 1) \leq P^{\Pi} \cdot (r^{\text{Единый тариф}} - (3_{\chi_i}^{\text{'э}} + 3_{\chi_i}^{\text{'а}} + C^{\text{Обработки ТКО}} + r^{\text{Размещения ТКО}}))$$

примет вид

$$\sum_{i=1}^n b_{i2} \cdot \chi_i \leq R_2.$$

Математическая постановка рассматриваемой задачи в новых обозначениях представляет собой

$$\left\{ \begin{array}{l} F(\chi) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \chi_i \mapsto \max \\ \sum_{i=1}^n b_{i1} \cdot \chi_i \leq R_1 \\ \sum_{i=1}^n b_{i2} \cdot \chi_i \leq R_2 \\ \sum_{i=1}^n \chi_i = m \\ \chi_i \in \{0;1\}, \forall i = \overline{1, n} \end{array} \right.$$

Решением поставленной задачи будет вектор χ^* , однозначно определяющий некоторую характеристическую функцию множества X : χ^* . Данная функция однозначно задает множество железнодорожных станций $X^* = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, $X^* \subseteq X$, создание на которых контейнерных терминалов погрузки-выгрузки ТКО обеспечит максимальный экономический эффект от переработки всего планового поступающих на железнодорожный транспорт объема ТКО, при этом достигается конкурентное экономическое преимущество относительно перевозки ТКО автомобильным транспортом, так как удовлетворяет критерию оптимизации,

$$\forall \chi: F(\chi^*) = \max \{ F(\chi) \}.$$

Помимо этого, решение χ^* удовлетворяет ограничению на число контейнерных терминалов, так как по условию $|\chi^*| = m$.

При замене ограничения

$$\sum_{i=1}^n \chi_i = m$$

на ограничение

$$\sum_{i=1}^n \chi_i \leq m,$$

будет достигнуто полное соответствие исследуемой задачи и двумерной «задачи о ранце». Тогда математическая постановка задачи о создании станций с контейнерным терминалом погрузки-выгрузки ТКО преобразуется к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} F(\chi) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \chi_i \mapsto \max \\ \sum_{i=1}^n b_{i1} \cdot \chi_i \leq R_1 \\ \sum_{i=1}^n b_{i2} \cdot \chi_i \leq R_2 \\ \sum_{i=1}^n \chi_i \leq m \\ \chi_i \in \{0;1\}, \forall i = \overline{1, n} \end{array} \right.$$

В результате решения данной задачи будет получен вектор χ^* , m_1 компонент которого равны 1, а $(n - m_1)$ компонент — 0. При этом возможны два случая: 1) $m_1 = m$, 2) $m_1 < m$. В первом случае вектор χ^* соответствует всем ограничениям предыдущей задачи и потому принимается как ее решение. Во втором случае, для получения искомого решения необходимо $(m - m_1)$ компонентам вектора χ^* , имеющим значение 0, присвоить значение 1.

Для этого из станций, которые не попали в множество X^* , нужно выбрать ту, которая имеет наибольшее значение параметра c_i , после чего компоненте вектора χ^* , которой она соответствует, присвоить значение 1 и включить данную станцию в множество X^* . Описанную процедуру повторять далее до тех пор, пока число

компонент вектора χ^* , имеющих значение 1, не станет равно m . Полученный в итоге вектор χ^* принимается как решение задачи о создании сети станций с контрейлерным терминалом погрузки-выгрузки ТКО. Оптимальность данного решения следует из того, что проведенная корректировка вектора χ^* фактически определяется решением дополнительной задачи целочисленного программирования

$$\left\{ \begin{array}{l} F(\bar{y}) = \sum_{i=1}^{n-m_1} c_i \cdot y_i \mapsto \max \\ \sum_{i=1}^{n-m_1} y_i = m - m_1 \\ y_i \in \{0;1\}, \forall i = \overline{1, n-m_1} \end{array} \right.$$

где компонентам вектора $\bar{y}$ соответствуют элементы множества $Y = \chi / \chi^*$. Данное решение выявляет те $(m - m_1)$ станции, включение которых в множество χ^* максимально увеличивает значение функции $F[1]$.

В целях подтверждения правильности определения математического решения задачи оптимизации размещения железнодорожных станций с контрейлерным терминалом для погрузки-выгрузки ТКО, приведенного к решению известной в дискретном программировании «задачи о ранце», при использовании общедоступного в сети Internet-ресурса [7] произведен расчет следующего примера с заданными исходными данными.

Пусть на сети железных дорог Z задано 10 различных железнодорожных станций, на которых возможно осуществление погрузочно-разгрузочных операций.

Суммарная резервная пропускная способность сети Z (суммарная вместимость «ранца») составляет 10 млн т в год.

Годовая пропускная и перерабатывающая способность станций (вес предмета, который необходимо загрузить в «ранец») сети Z имеет следующие показатели, млн т (табл. 1):

Таблица 1

Заданные показатели «веса» предмета в «задаче о ранце»

Ст. №1 (X_1)	Ст. №2 (X_2)	Ст. №3 (X_3)	Ст. №4 (X_4)	Ст. №5 (X_5)	Ст. №6 (X_6)	Ст. №7 (X_7)	Ст. №8 (X_8)	Ст. №9 (X_9)	Ст. №10 (X_{10})
1.2	0.7	2.4	0.5	3.6	1.8	3.2	0.3	4.1	2.2

Разница между доходными поступлениями от деятельности по переработке съемных кузовов с ТКО на данных станциях и их перевозке на сети Z и суммарными капитальными вложениями и эксплуатационными расходами на организацию переработки ТКО на данных станциях (ценность предмета, который необходимо загрузить в «ранец») имеет следующие показатели, млн руб. (табл. 2):

Таблица 2

Заданные показатели «ценности» предмета в «задаче о ранце»

Ст. №1 (X_1)	Ст. №2 (X_2)	Ст. №3 (X_3)	Ст. №4 (X_4)	Ст. №5 (X_5)	Ст. №6 (X_6)	Ст. №7 (X_7)	Ст. №8 (X_8)	Ст. №9 (X_9)	Ст. №10 (X_{10})
1.4	3.2	0.3	5.7	0.6	1.7	1.3	2.1	4.2	2.9

В итоге наилучший вариант размещения контрейлерного терминала погрузки-выгрузки ТКО на предложенных станциях $X_1, X_2, \dots, X_{10}$ сети Z (загрузки «ранца») достигается при значениях: $X_1=1, X_2=1, X_3=0, X_4=1, X_5=0, X_6=1, X_7=0, X_8=1, X_9=1, X_{10}=0$.

Максимальный «вес рюкзака» (доход) $f_1(10)$ равен 17 млн руб. при заполняемости «ранца» (использовании резерва пропускной способности сети Z) на 86% (8,6 млн т из 10 млн т). 

Литература

1. Гусейнов, Р. Р. Техничко-технологические параметры железнодорожных станций, обслуживающих контейнерный терминал : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гусейнов Рамис Расим оглы ; Московский государственный университет путей сообщения. - Москва, 2015. - 217 с. - Текст : непосредственный.
2. Гусейнов, Р. Р. Техничко-технологические параметры железнодорожных станций, обслуживающих контейнерный терминал : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гусейнов Рамис Расим оглы ; Московский государственный университет путей сообщения. - Москва, 2015. - 24 с. - Текст : непосредственный.
3. Территориальная схема обращения с отходами города Москвы. - Текст : электронный // Официальный сайт Мэра Москвы www.mos.ru. Обновляется в течение суток. - URL : <https://www.mos.ru/dgkh/documents/skhemy/view/263483220/> (дата обращения : 13.11.2023).
4. Территориальная схема обращения с отходами Московской области. - Текст : электронный // Официальный сайт Департамента жилищно-коммунального хозяйства Московской области. Обновляется в течение суток. - URL : <https://mgkh.mosreg.ru/dokumenty/normotvorchestvo/postanovleniya/21-02-2022-14-38-07-postanovlenie-pravitelstva-moskovskoy-oblasti-ot/> (дата обращения : 13.11.2023).
5. Сигал, И. Х. Введение в прикладное дискретное программирование : Модели и вычислительные алгоритмы / И. Х. Сигал, А. П. Иванова. - Москва : Физматлит, 2002. - 237 с. - Текст : электронный.
6. Пашков, Н. Н. Транспортная логистика (линейное программирование): учебное пособие / Н.Н. Пашков. - Москва : Прометей, 2020. - 202 с. - Текст : непосредственный.
7. Семестр.ру. Задача о рюкзаке // Электронный ресурс. - URL : <https://math.semestr.ru/dinam/backpack.php>. (дата обращения : 13.11.2023). - Текст : электронный.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМ ВОДОТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ТРАНСПОРТНОМ КОМПЛЕКСЕ

Проанализированы основные проблемы водотеплоснабжения, традиционные пути их решения и целесообразность разработки нового подхода к устранению негативных факторов.

Ключевые слова: низкое качество труб, высокая степень износа, вторичное загрязнение воды, биокоррозия, деполяризация электрохимической коррозии, скорость коррозии

EDN: FJESAJ



М.Н. Торопов

Основные проблемы систем водотеплоснабжения в транспортном комплексе (ремонтные предприятия, подвижной состав)

Согласно национальному докладу «Теплоснабжение Российской Федерации. Пути выхода из кризиса», тепловые сети России — самые дорогие в мире. Из-за низкого качества труб и еще более низкого качества работ по переукладке трубопроводов реальный срок их службы составляет 5–7 лет вместо 25 запланированных. По сравнению с Западной Европой аварийность водопроводных сетей РФ в 2–4 раза выше (рис. 1) [1;2].

Столь большую разницу можно объяснить высокой степенью износа систем и несоблюдением требований нормативных документов на их эксплуатацию. Интенсивность отказов зависит также от диаметров трубопроводов. Самыми проблемными являются трубопроводы распределительных сетей (рис. 2) [3].

Именно в них из-за коррозии и отложений возникает так называемое вторичное загрязнение транспортируемой воды. Это делает бессмысленным предварительную водоподготовку традиционными методами, так как в этом случае нет возможности обеспечить потребителей доброкачественной питьевой водой, в том числе и в пассажирских вагонах. Существенно при этом увеличиваются и затраты энергии на транспортировку воды по загрязненным поверхностям.

Перечисленное осложняется также тем, что при общей системе водотеплоснабжения у магистральных сетей один хозяин, а у распределительных — другой. Давно сложившийся в России отраслевой стереотип, когда на стыке областей неплохая автомагистраль превращалась в бездорожье.

При этом качество питьевой и технической воды, ее соответствие санитарно-эпидемиологическим нормам определяется как качеством воды в самом источнике водоснабжения, так и состоянием транспортирующих

Торопов Михаил Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: прочность и надежность конструкций, улучшение качества воды. Автор более 170 научных работ.

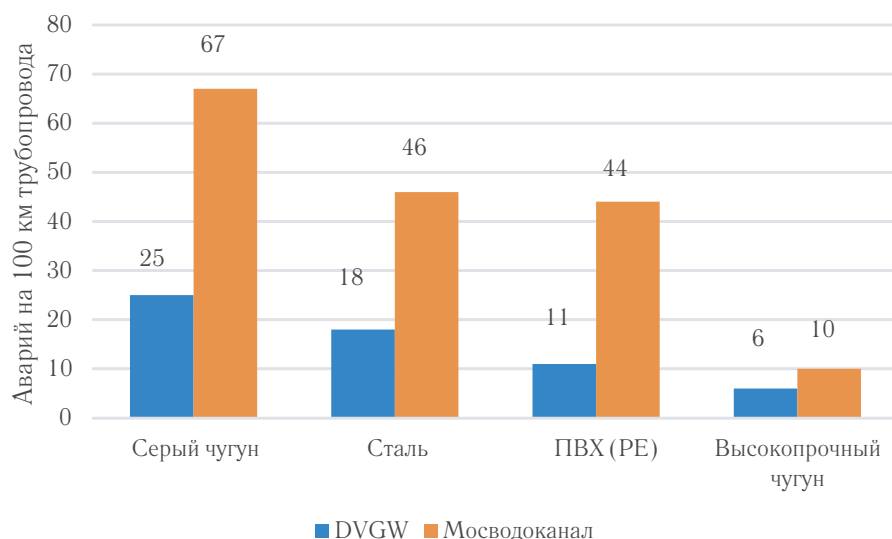


Рис. 1. Статистика повреждения трубопроводов по данным Мосводоканала и DVGW (Германия)

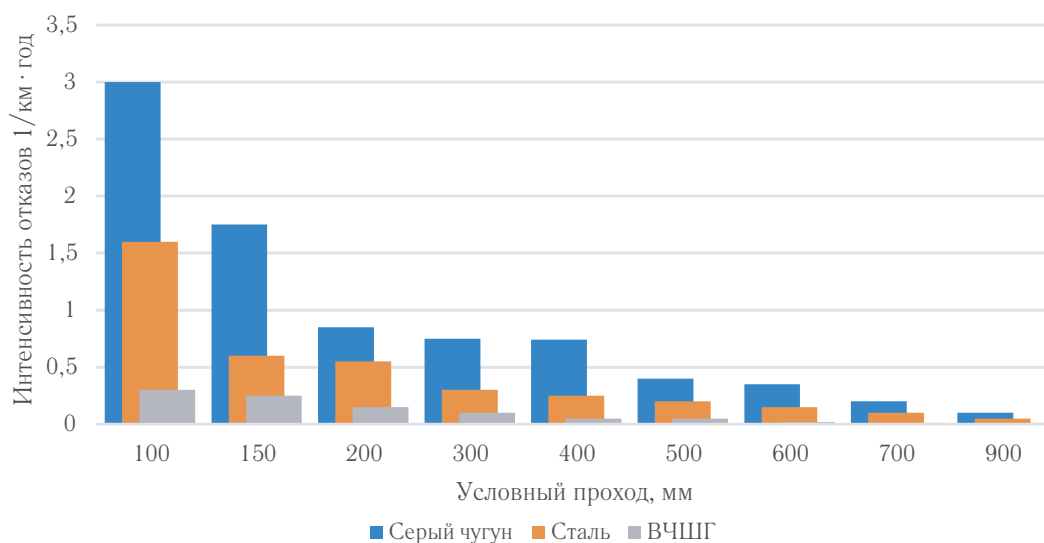


Рис. 2. Зависимость интенсивности отказов трубопроводов Московского водопровода от диаметра труб, изготовленных из различных конструкционных материалов

сетей, степенью их загрязнения продуктами коррозии, песчано-глинистыми и органическими отложениями. Подобные загрязнения способствуют развитию в трубопроводах биопроцессов, росту колоний железистых, сульфат- и сульфат-нитрозо- и нитратбактерий, водорослей и грибов. Проявлением этого являются: биокоррозия, деполяризация электрохимической коррозии, образование запахов, подкисление воды, загрязнение ее коллоидами, железом, марганцем [4].

Эти факторы особенно сильно влияют на коррозионность водной среды и интенсивность ее накопления, не учитываемые СанПиН 2.1.3684-21,

но определяющие в конечном итоге как энергоэффективность, так и безопасность и экологичность эксплуатации систем водотеплоснабжения и водоснабжения.

При этом следует принимать во внимание и особенности систем водотеплоснабжения транспортного комплекса, а именно:

- большое количество присоединенных зданий (часто небольших объемов);
- достаточно протяженные сети небольших диаметров. Использование тупиковых схем горячего водоснабжения;

- большое количество котельных с мини и малой мощностью. Велика доля котельных на твердом и жидком топливе;

- в новых и относительно мощных котельных используется умягчение добавочной воды, термическая/химическая дегазация, фосфатирование. В других котельных подпитка идет сырой водой.

При умягчении воды путем натрий-катионирования повышается ее коррозионность и часто наблюдается повышенный уровень коррозии металла. При работе на сырой воде криминальны отложения накипных солей. Во многих случаях отсутствует деаэрация, либо она осуществляется в нерасчетных режимах (с недогревом воды). Такая многофакторность осложняет картину.

Внедряя авторские технологии на обширных территориях (рис. 3,4), было определено (рис. 5,6), что на исследуемых объектах скорость коррозии превышает аварийные значения (0,2 мм/год) в 2–8 раз, интенсивность накипеобразования в 2–6 раз. При этом толщина отложений варьируется от 2 до 12 мм [5].

Как видно из рис. 5,6, качество исходной воды в системах водотеплоснабжения далеко не идеально.

В качестве примера приведем официальные данные по состоянию систем водотеплоснабжения одной из областей РФ, а именно Тульской области: износ сетей водоснабжения 85–89%, отсутствие водоподготовки, превышение ПДК по железу, жесткости, сухому остатку, стабильному стронцию. Более 43% жителей области не получают воду надлежащего качества. К этому стоит добавить загрязнение воздуха вредными выбросами и водоемов сточными водами от объектов теплоэнергетики.

Как следует из рис. 5, самые высокие значения коррозионности водной среды (1,64–2,14 мм/год) наблюдаются в Москве в зоне, прилегающей к Северному направлению Московской железной дороге. Это вокзалы на Комсомольской площади, Рижский вокзал, вагонные, локомотивные депо. По свидетельству работников коммунальных служб, трубы теплотрасс, проходящие вдоль путей, зачастую меняют раз в три года вследствие их коррозионного разрушения. Этому может способствовать и гидравлическое состояние почв, насыщенность их водой. Так, более 20 притоков реки Яузы находятся в этом районе. В целом, Московская впадина богата водой (порядка 190 рек, ручьев, водоемов). До 40-х годов прошлого века вода в паводки в Москве поднималась на 6–9 м. По сравнению с Санкт-Петербургом (2,8 м) это более чем в два–три раза выше [6].

Этому может способствовать и тектоническая деятельность московских недр. Из двенадцати московских тектонических разломов, самые протяженные и «живые» находятся именно в этом районе [6].

Подобные проблемы существуют и в других регионах РФ. Причем качество воды, кроме влияния на организм человека, определяет и технологические параметры используемого оборудования. В частности, автором определена взаимосвязь коррозионной агрессивности и интенсивности накипеобразования воды (рис. 7,8), заправляемой в системы пассажирских вагонов, с технологическими параметрами их эксплуатации (скоростью коррозии, перерасходом топливно-энергетических ресурсов (ТЭР)).

Оценена интенсивность накипеобразования при нагревании воды, взятой из заправочных гидран-



Рис. 3. География распространения энергетического метода водоподготовки (ЭМВ) на ремонтных предприятиях транспортного комплекса



Рис. 4. География распространения ЭМВ на системах водотеплоснабжения и калориферных ветвях пассажирских вагонов

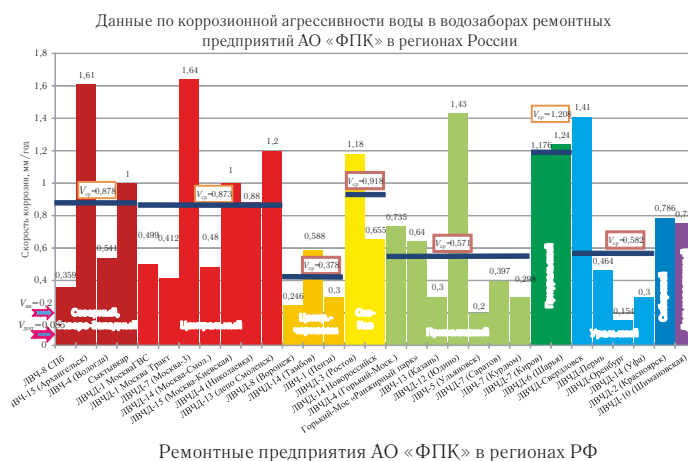


Рис. 5. Коррозионная агрессивность воды, используемой в системах водотеплоснабжения ремонтных предприятий и подвижного состава в различных регионах РФ

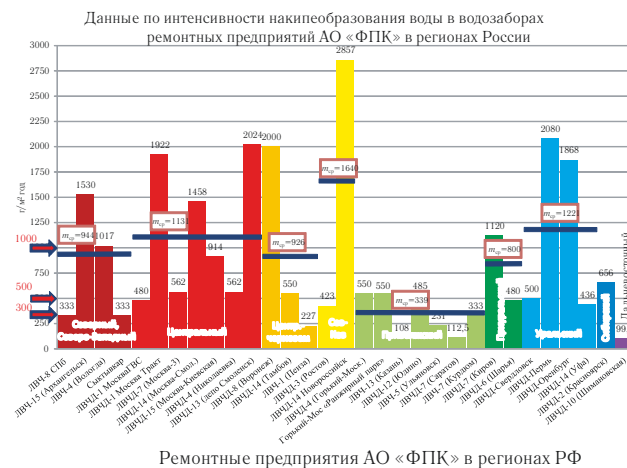


Рис. 6. Интенсивность накипобразования воды, используемой в системах водотеплоснабжения ремонтных предприятий и подвижного состава в различных регионах РФ

тов ряда железнодорожных станций (Архангельск, Вологда, Воркута, Киров, Москва и др.).

Также оценен индекс стабильности воды j в тех же пунктах, характеризующий уровень ее агрессивности. Полученные результаты сравнивали со скоростью коррозии и перерасходом электроэнергии на отопление пассажирских вагонов, регулярно и длительное время курсирующих по направлениям Москва—Воркута, Москва—Архангельск, Москва—Пекин, Москва—Улан-Батор.

Установлено, что коррозионность воды и интенсивность ее накипеобразования в конечном итоге определяют перерасход ТЭР на отопление вагонов и ресурс эксплуатации систем. Так на условном Восточном направлении, перерасход электроэнергии на отопление составил 10,6% за период наблюдения 4 года, а на условном Северном направлении — 29,7% за тот же срок. Кроме того, скорость коррозии металла в системах водотеплоснабжения пассажирских вагонов

также больше на Северном направлении, что определяет увеличение затрат на их ремонт.

При этом по мнению специалистов из Института микробиологии им. С.В. Виноградского РАН (ИНМИ РАН) как на водопроводных, так и на тепловых сетях до температур 80—85°C прослеживается как электрохимическая, так и микробиологическая коррозия (рис. 9) [7;8].

Причем микробиологическая коррозия выявляется как на металлических, так и на пластиковых и металлопластовых сетях, в том числе и при использовании низкотемпературных жидкостей [14]. На тепловых сетях вследствие возникновения термических напряжений она вызывает разрушение конструкций, на водопроводных — насыщение воды железом, марганцем. С микробиологической коррозией борются окислителями, электрохимической — ингибиторами. При этом известно, что ингибиторы усиливают микробиологическую коррозию

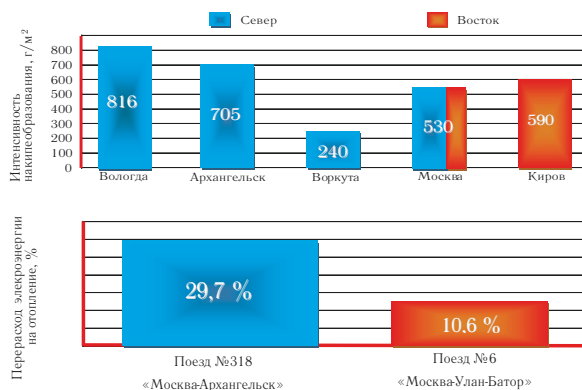


Рис. 7. Взаимосвязь интенсивности накипеобразования в заправочных гидрантах и перерасхода электроэнергии на отопление вагонов поездов Северного и Восточного направлений

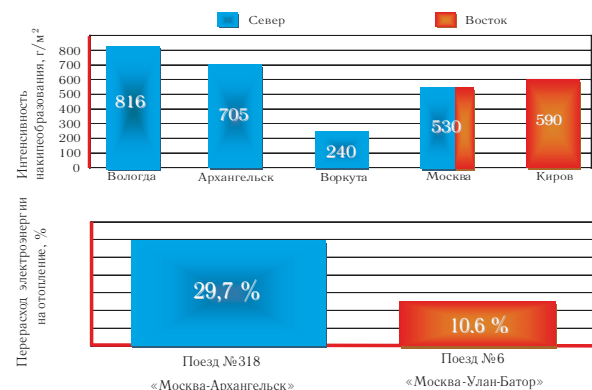


Рис. 8. Взаимосвязь коррозионной агрессивности воды в пунктах экипировки вагонов водой и скорости коррозии в системах водотеплоснабжения поездов Северного и Восточного направлений



Рис. 9. Микробиологическая коррозия на сетях заправки вагонов водой и водопроводе пассажирского вагона

[9]. Указанные проблемы зачастую решаются с применением нескольких технологий [10;11].

Перед автором стояла сложная задача — обеспечить энергоэффективность, экологичность и безопасность сетей, которую к тому же предстояло решить в рамках единой технологии.

Традиционные пути решения проблемы

Большинство перспективных наработок в рамках решения проблемы износа трубопроводов носит конструкционный характер [12] и требует адекватных капитальных затрат (полная или частичная замена трубопроводов и оборудования, различные полиэтиленовые и «рукавные лейнеры» без разрушения старых сетей — «труба в трубе», пневмопробойники и разрушители ветхих трубопроводов с одновременным протаскиванием «жестких» лейнеров, микротоннелирование с применением полимерных обечаек и др.). Особо следует отметить технологии анодной и катодной защиты.

Перечисленные методы связаны с большими материальными и трудовыми затратами. Но проблему они не решают, так как не меняются параметры водной среды с ее высокими коррозионностью и интенсивностью накипеобразования.

Для стабильной работы трубопроводов также важен выбор материалов, их пригодность к местным климатическим условиям. В России в основном применяют стальные трубы. Так, по данным Мосводоканала при протяженности сетей в Москве на 2010 год свыше 10 тысяч км, стальные трубы составляли 72% от общей протяженности сетей, чугунные 26% (в том числе

около 2000 км труб из высокопрочного чугуна), железобетонные и трубы из полиэтилена порядка 2%.

Недостатки полимерных труб при существенном плюсе — несклонности к электрохимической и газовой коррозии известны [13]. Это сравнительно небольшой срок службы. И хотя называется срок эксплуатации 50 лет, эти данные вызывают сомнения. Заверения многих поставщиков, что их трубы рассчитаны на температуру 95°C и давление 10 атм. (1,0 МПа), абсолютно не говорят об их долговечности при таких параметрах. С такими значениями любая пластмассовая труба прослужит не более 2–3 лет.

На рис. 10 приведен характерный вид разрушений пластиковых трубопроводов на ремонтных предприятиях АО «ФПК». Образование такого дефекта, как вспучивание трубопровода (отдушины) зачастую происходит в течение 2 лет после ввода его в эксплуатацию [15].

По данным DIN8077A1 и НИИ Мосстроя, труба из полимера PN20 при температуре 95°C и давлении 0,54 МПа прослужит 5 лет. К этому следует добавить низкие показатели длительной прочности, малый модуль упругости, повышенную ползучесть, атмосферное старение. Механическая прочность пластмассовых труб не позволяет с ними обращаться как со стальными.

Следует указать и большую чувствительность к ударным нагрузкам при отрицательных температурах и наличие в сетях биокоррозии [15].

Все это свидетельствует о том, что вряд ли в России с ее суровыми климатическими условиями произойдет смена такого привычного материала как металл. Это подтверждает и тот факт, что в странах, близких к нам по климатическим условиям (Канада, север

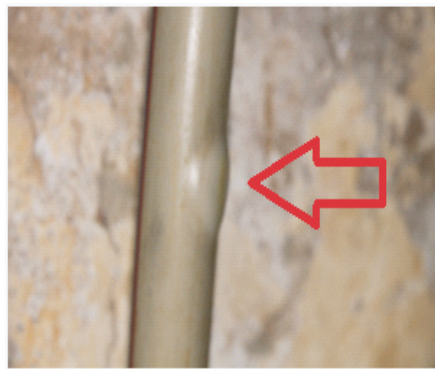
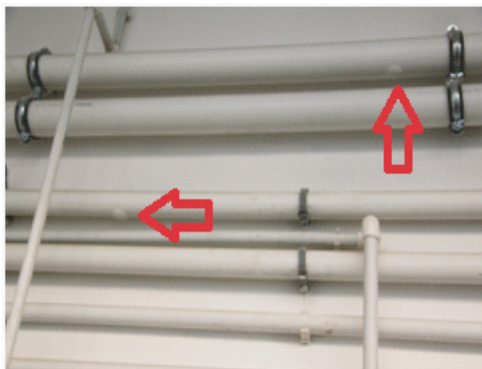


Рис. 10. Вид разрушения пластиковых конструкций в системах теплоснабжения ремонтных предприятий. Образование «отдулин» (указано стрелкой) на поверхности трубопроводов после двух лет эксплуатации. На этом месте произойдет разрушение конструкций

США), наибольшее распространение (80%) получили металлические трубы. Среди них наблюдается значительный рост трубопроводов из высокопрочного чугуна (ВЧ). Безаварийный срок службы таких труб составляет 80÷100 лет. В системах канализационных сточных вод — 50÷60 лет. Для ВЧ свойственны высокие механические характеристики близкие к стали 55.

Тот факт, что общее количество труб из черных металлов не снизится ниже 75%, подтверждает то, что по данным Международного института стали (JISI) в мире наблюдается дальнейший рост производства черных металлов. 25% полученного металла — это будущие трубопроводы. Для сравнения, такая металлоемкая отрасль как железнодорожный транспорт — это всего лишь 8%.

Главный вклад в этот процесс вносят страны Азии. В условиях глобализации мировой экономики промышленно развитые страны ориентируются на ускоренный рост наукоемких и экологически чистых производств в своих странах, увеличивая инвестиции в расширение неэкологичного производства черных металлов вне своих регионов.

Сравнительные технологические характеристики трубопроводов из черных металлов и пластмассы приведены в таблице.

Обращает на себя внимание (см. таблицу), что пластмассовые трубы, по мнению японских специалистов, в виду своих низких прочностных характеристик обходятся почти в четыре раза дороже стальных трубопроводов.

Что касается меди, при всех своих достоинствах медные трубы имеют два минуса. Они ускоренно разрушаются при взаимодействии с кислой средой при несоответствии водной среды санитарным нормам. Сказанное является частым явлением для РФ [15]. И второй минус — цена [16].

При несоответствии транспортируемой воды санитарным нормам возможно и межкристаллическое разрушение конструкций даже из нержавеющей стали (рис. 11).

Кроме металлических, нашли применение, в частности в США, трубы из композитных материалов со сроком службы 30÷50 лет [16].

В начале 2000-х годов XX века в России успешно продвигалась отечественная разработка — базальтовые трубы [10;17]. Они лишены существенных недостатков пластика. Срок службы таких труб в различных климатических условиях составляет 60÷100 лет. Но эта перспективная технология была в свое время успешно «похоронена».

Но раз остается металл, в том числе и выбранный с позиции «цена — качество», остаются и проблемы с ним связанные, а именно необходимость проведения дополнительной антикоррозионной и антиадгезионной обработки трубопроводов и оборудования во время эксплуатации.

При этом следует иметь ввиду, что провести защитные мероприятия по всей внутренней поверхности систем традиционными методами одновременно практически невозможно.

Таблица

**Некоторые сравнительные технологические характеристики трубопроводов
из черных металлов и пластмассы**

Материал	Отношение стоимости 1 кг материала к его удельной прочности*, йены	Интенсивность биообрастаний**, мг/см ² /100 ч	Стойкость материала к хлорированию	Экологическая безопасность материала
ЧЕРНЫЙ МЕТАЛЛ	0,9	40±3,0	Стоек	Инертен
ПЛАСТМАССА	3,5	25±5,0	Нестоек	Выделяет вредные вещества

* В.Н. Бернадский, О.К. Маковецкая ИЭС им. Патона. Сталь и алюминий, основные конструкционные материалы сварочного производства. Технология машиностроения, 2005 г., № 2, стр. 5-21 (стр. 7). В статье, в том числе, представлены расчеты японских специалистов по определению затрат при использовании трубопроводов из черных металлов и пластмасс.

** М.Н. Менча. Формирование биообрастаний на традиционных материалах оборудования системы питьевого водоснабжения. Сборник докладов 7-го международного конгресса «Вода: экология и технологии», часть 1, стр. 591.

В сетях теплоснабжения для улучшения ситуации используют различные технологии водоподготовки, которые в какой-то мере позволяют решить указанные задачи, оставляя при этом нерешенные вопросы, а именно [18]:

1. Отсутствие длительной защиты от возникновения коррозионных и соленакипных процессов на поверхностях трубопроводов и оборудования (это касается и водопроводов).

2. Невозможность устранения протечек, тепловых потерь.

3. Невозможность уменьшения объема сточных вод и концентрации вредных компонентов в выбросах в атмосферу.

4. Невозможность приведения параметров водно-химического режима к требованиям нормативных документов.

Использование в качестве защиты от накипи химводоподготовки существенно влияет на экологическую ситуацию. Химводоподготовка — процедура сложная и дорогостоящая. Она сопряжена с необходимостью содержания кислотных и щелочных хозяйств, а также образованием большого количества кислотосодержащих и солевых стоков, утилизация которых с экологической точки зрения проблематична.

Кроме того, химическая очистка вызывает разрушение обрабатываемых конструкций. На рис. 12 представлено сравнительное состояние теплопрово-



Рис. 11. Коррозионные разрушения систем водоохлаждения импортного оборудования (Германия), выполненного из нержавеющей стали из-за употребления воды низкого качества (псевдоустойчивой)



Рис. 12. Внешний вид трубопровода отопления вагона после химической очистки (слева) и после применения энергетического метода (справа)

дов пассажирского вагона после химической очистки и разработанного автором энергетического метода водоподготовки.

С учетом сложившейся ситуации родилось новое направление, связанное с развитием гидравлического расчета металлических труб с отложениями [19]. Такой подход позволяет определить оставшийся ресурс трубопроводов.

Перечисленное повлияло на необходимость разработки нового подхода к проблеме.

Заключение

Замена трубопроводов в системах водотеплоснабжения в России происходит в 4–5 раз чаще, чем в Западной Европе. В основном это связано со вторичным загрязнением транспортируемой воды. В распределительных сетях указанное явление наблюдается чаще, чем в магистральных.

Проведенные исследования на значительном количестве объектов водотеплоснабжения РФ подтвердило высокие значения коррозионности водной среды и ее интенсивности накипеобразования.

Установлена взаимосвязь между указанными параметрами водной среды с технологическими параметрами эксплуатации вагонного парка (скорость коррозии, перерасход ТЭР).

Использование пластиковых трубопроводов по мнению японских специалистов обходится в 3–4 раза дороже применения трубопроводов из черных металлов, ввиду низких прочностных свойств пластика.

Для продления срока службы черных металлов и сплавов (чугун, в том числе высокопрочный, сталь) целесообразно применять антикоррозионную и антиадгезионную обработку. В результате ресурс эксплуатации стальных трубопроводов можно повысить, по крайней мере, до 50–70 лет. 

Литература

1. Торопов, М.Н. О возможности выполнения в России решений Киотской конференции / М.Н. Торопов. - Текст : непосредственный // Технология машиностроения. - 2005. - №2. - С. 52-60.
2. Программный подход к решению проблем износа основных производительных фондов — путь улучшения ситуации в ЖКХ / В.М. Круглов [и др.] . - Текст : непосредственный // Реформа ЖКХ. - 2004. - №4. - С. 28-32.
3. Торопов, М.Н. Износ — проблема общая / М.Н. Торопов. - Текст : непосредственный // Технология машиностроения. - 2004. - №6. - С. 45-53.
4. Торопов, М.Н. Комплексный подход к приведению качества питьевой воды в соответствие с санитарно-эпидемиологическими нормами / М.Н.Торопов. - Текст : непосредственный // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. - 2006. - №7. - С. 32-34.
5. Продление ресурса эксплуатации и повышение энергоэффективности систем водотеплоснабжения и водохлаждения / М.Н. Торопов, П.П. Бегунов А.С., Селиванов, И.Е. Перков. - Текст : непосредственный // Инженерные системы. - 2020. - №1. - С. 34-42.
6. Давиденко, И. Ресурсы цивилизации / И. Давыденко, Я.Кеслер. - Москва : Эксмо, 2005. - 544.
7. Розанова, Е. П. Распространение сульфатовосстанавливающих бактерий трубопроводов тепловой сети и причины появления в воде сероводорода / Е.П. Розанова, Л.А. Ентальцева. - Текст : непосредственный // Микробиология. - 1999. - Т. 68, №1. - С. 100-106.
8. Микроорганизмы в тепловых сетях и внутренняя коррозия стальных трубопроводов / Е.П. Розанова [и др.] . - Текст : непосредственный // Микробиология. - 2003. —Т. 72, №2. - С. 212-220.
9. Так ли безопасны ингибиторные комплексы для систем водоохлаждения дизелей тепловозов? / М.Н. Торопов, А.С. Селиванов, Н.В. Васильев, П.П. Бегунов, И.Е. Перков // Наука и техника транспорта. - 2022. - №1. - С. 11-17.
10. Торопов, М.Н. Материалы для тепловодопроводов. Металл или пластик? / М.Н. Торопов. -Текст : непосредственный // Сантехника.Отопление.Кондиционирование. - 2006. - №12. - С. 36-42.
11. Торопов, М.Н. Результаты внедрения «ТермоДАВ» на объектах стационарной теплоэнергетики / М.Н. Торопов. - Текст : непосредственный // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. - 2007. - №1. - С. 22-24.

12. Храменков, С. В. Бестраншейные методы восстановления водопроводных и водоотводящих сетей : учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности 290800 «Водоснабжение и водоотведение» / С. В. Храменков, О. Г. Примин, В. А. Орлов. - Москва : ТИМР, 2000. - 179 с. ISBN 5-87010-106-9 . - Текст : непосредственный.
13. Круглов , В.М. Новый отечественный метод санации трубопроводов / В.М. Круглов , М.Н. Торопов М.Н. - Текст : непосредственный // Российское общество бестраншейных технологий (РОБТ). - 2006 . - №4 . - 44-45.
14. Топалов , С. Российские теплосети. Проблемы и решения / С. Топалов . - Текст : непосредственный // Полимерные трубы. - 2004. - №2. - С. 8-16.
15. Торопов , М.Н., Некоторые особенности применения энергетического метода водоподготовки (ЭМВ) на пластиковых и металлопластовых сетях / М.Н. Торопов , Н.В. Васильев , И.Е. Перков . - Текст : непосредственный // Инженерные системы. - 2021 . - №2 . - С. 38-44.
16. Ионов , В.С. Медные трубы в системах водо- тепло- и газоснабжения / В. С. Ионов . - Текст : непосредственный // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. - 2006 . - №2. - С. 32-40.
17. Базальтовые трубы для транспортировки жидкостей и для кабельной канализации / Л.Н. Смирнов, З.И. Карпова , А.В. Смирнов , Ю.К. Куницын . - Текст : непосредственный // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI век. - 1999 . - №4. - С. 10-16.
18. Взаимосвязь экологичности, безопасности и энергоэффективности при использовании ЭМВ в системах водотеплоснабжения / М.Н. Торопов , А.С. Селиванов , И.Е. Перков , Н.В. Васильев . - Текст : непосредственный // Инженерные системы. АВОК - Северо-Запад. - 2022 . - №1 . - С. 32-43.
19. Продоус , О.А. Новый подход к гидравлическому расчёту металлических трубопроводов водоснабжения с отложениями на внутренних стенках / О.А. Продоус, П.П.Якубчик .- Текст : непосредственный // Инженерные системы. - 2022. -№1 . - С. 28-30.

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗАНИЯ ГРУНТОВ МОДЕЛЯМИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН

Описывается универсальный стенд для исследования резания грунтов моделями рабочих органов землеройных машин (патент на изобретение № 2689958). Стенд позволяет проводить исследования резания грунтов в трех средах: в обычной среде (при атмосферном давлении), водной среде (при гидростатическом давлении) и в разреженном пространстве (вакууме). При этом возможно проведение исследований с режущими органами поступательного действия (моделями отвалов, кабелеукладочных ножей и т.д.) и рабочими органами вращательного действия (ковш экскаватора, грейфера).



Х.А. Дианов

Ключевые слова: стенд, универсальный, вакуум, гидростатическое давление

EDN: FQWBNX

В строительстве, как и в других отраслях народного хозяйства, развитие определяется технологическими достижениями и опережающим развитием средств механизации.

В 50-х годах XX в. в России был освоен метод возведения подземных сооружений способом «стена в грунте», который в настоящее время широко используется при строительстве тоннелей, при возведении подземных частей промышленных, энергетических и гражданских зданий, гидротехнических, транспортных и коммунальных инженерных сооружений.

Особенность разработки траншей способом «стена в грунте» заключается в том, что копание осуществляется под гидростатическим давлением глинистой суспензии. Процессы разработки грунтов в таких необычных условиях изучены еще недостаточно, а рабочие органы землеройных машин рассчитываются и проектируются в основном традиционными методами, созданными для условий эксплуатации в воздушной среде.

В тоже время большими темпами осваивается космическое пространство, и в недалеком будущем

понадобятся землеройные машины для работы на других планетах.

Для создания эффективных, высокопроизводительных рабочих органов землеройных машин, необходимо проведение значительного объема теоретических и экспериментальных исследований с применением методов физического моделирования с использованием специальных стендов.

С целью расширения области исследований был спроектирован универсальный стенд, позволяющий проводить исследования резания грунтов в трех средах: в обычной среде (при атмосферном давлении), водной среде (при гидростатическом давлении) и в разреженном пространстве (вакууме).

Особенностью стенда является возможность впервые проводить исследования в разреженном пространстве (вакууме), при этом также проводить исследования в обычных условиях и под водой (гидростатическом давлении).

Экспериментальные исследования по резанию грунтов в разреженном пространстве (вакууме) позволят выявить влияние атмосферного давления на про-

Дианов Харис Ахматович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), Изобретатель СССР. Область научных интересов: строительные дорожные машины, резание грунтов рабочими органами землеройных машин. Автор более 90 научных работ. Имеет шесть авторских свидетельств и один патент на изобретение.

цессы взаимодействия рабочих органов землеройных машин с грунтом и дать рекомендации по проектированию рабочих органов для работы там, где атмосферное давление отсутствует (например, на Луне).

Проведение экспериментальных исследований в вакууме также позволят уточнить теоретические зависимости для расчета сопротивлений резанию грунтов рабочими органами землеройных машин.

Исследования резания грунтов под гидростатическим давлением сделают возможным дать рекомендации для землеройных машин, работающих при строительстве способом «стена в грунте», где копание происходит под слоем глинистого раствора.

На рис. 1 изображен общий вид стенда. На рис. 2 — контейнер с рамкой на оси, включающий рычаг и модель исследуемого рабочего органа (вид сверху).

Стенд включает герметичный корпус 1, внутри которого расположено тензозвено 2 с установленным на нем упором 3 со свободно вращающимся съемным упорным колесом 4. Тензозвено 2 с упором 3 и колесом 4 установлено на каретке 5. Последняя перемещается по продольной направляющей 6 с помощью винтовой передачи 7, приводимой в действие от электродвигателя 8. На контейнере 9 установлена

съемная поперечная ось 10, на которой шарнирно установлена съемная рамка 11 в виде двуплечего рычага. Поперечная ось 10 расположена по высоте ниже оси вращения упорного колеса 4.

По одну сторону оси 10 на ближнем плече рамки 11 жестко закреплен кронштейн 12, выполненный изогнутым.

По другую сторону оси 10 на другом плече рамки 11 болтами закреплена сменная модель 13 рабочего органа. Источник жидкости системы гидростатического давления последней содержит металлоконструкцию 14, вертикальный цилиндр 15, шток 16 которого соединен с грузовой платформой 17 с расположенными на ней калиброванными грузами 18. Грузовая платформа 17 поднимается в верхнее положение лебедкой 19 с помощью каната 20.

Для разделения жидкости, наполняющей герметичный корпус 1 (например, вода, глинистый раствор и т.п.) и масла, наполняющего вертикальный цилиндр 15, в напорном трубопроводе 21 установлена камера 22 с разделительной диафрагмой. С напорным трубопроводом 21 параллельно источнику давления соединен через дополнительную камеру 23 с разделительной диафрагмой баллон 24 со сжатым

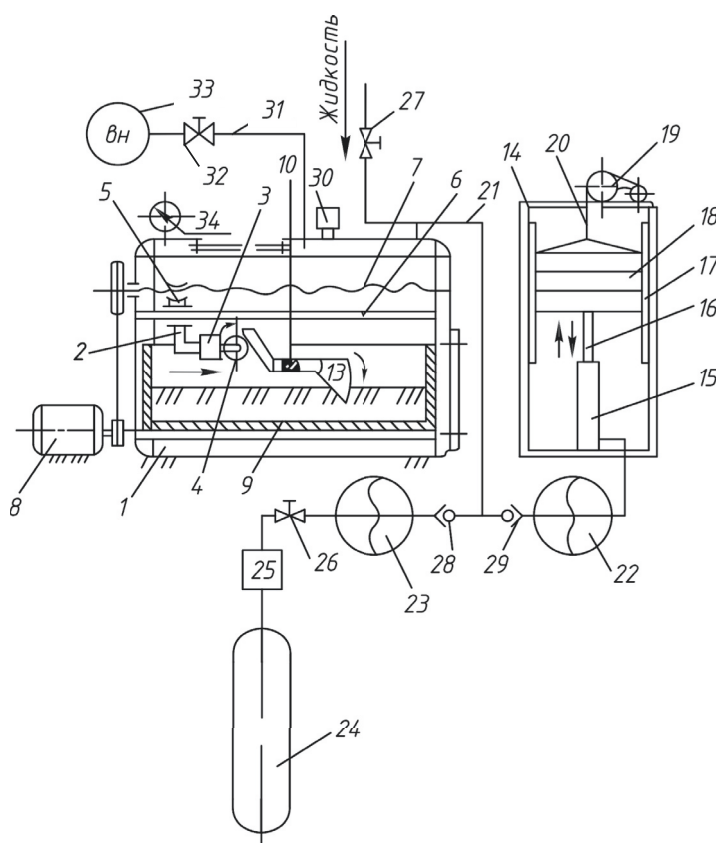


Рис. 1. Общий вид стенда

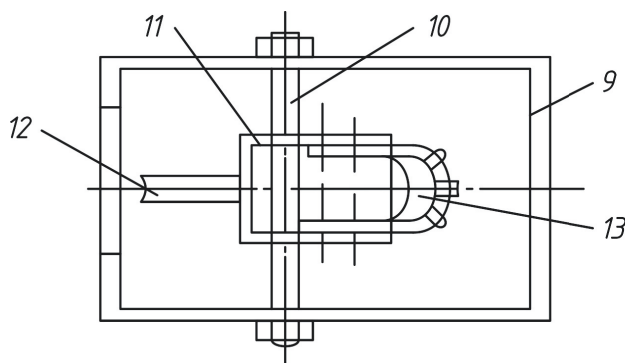


Рис. 2. Вид сверху

газом, снабженный редуктором 25 и вентилем 26. Для заливки жидкостью герметичного корпуса 1 на напорном трубопроводе 21 смонтирован вентиль 27. Между напорным трубопроводом 21 и камерами 22 и 23 с разделительными диафрагмами смонтированы соответственно обратные клапаны 28 и 29.

В верхней части герметичного корпуса 1 имеется предохранительный клапан 30 и дополнительный трубопровод 31 с вентилем 32 и вакуумным насосом 33, а также манометр (вакуумметр), который выполнен съемным.

Стенд работает следующим образом.

После подготовки грунта в контейнере на нем между боковыми стенками крепится ось 10 с рамкой 11, включающей в себя кронштейн 12 и закрепленную на болтах модель 13 исследуемого рабочего органа, а на тензозвене 2 устанавливается упор 3 с колесом 4. Затем вместо манометра 34 устанавливается вакуумметр, открывается вентиль 32 и включается вакуумный насос 33, который через трубопровод 31 выкачивает воздух из герметичного корпуса, при этом степень разрежения контролируется вакуумметром 34. Вентили 27 и 26 находятся в закрытом положении.

Тензозвено 2 с установленным на подшипнике колесом 4 взаимодействует с кронштейном 12, создавая крутящий момент относительно оси 10. Рамка 11 с моделью 13 совершают поворот относительно оси 10, и производится резание. Усилие резания воспринимается тензозвеном 2 с последующей записью на осциллографе (компьютере) (не показаны).

Для моделирования резания грунта при поступательном движении (моделями отвалов, кабелеукладочных ножей и т.д.) производится демонтаж оси с размещенной на ней рамкой 11, а на тензозвене 2 вместо упора с колесом устанавливается модель исследуемого рабочего органа.

Для моделирования резания под гидростатическим давлением перекрывается вентиль 32, вместо вакуумметра 34 устанавливается манометр, а через вентиль 27 в герметичный корпус по напорному трубопроводу 21 заливается жидкость через вентиль 27. После заполнения жидкостью герметичного корпуса 1 перекрывают вентиль 27 и с помощью вентилей 26 подают давление сжатого газа из баллона 24 на разделительную диафрагму дополнительной камеры 23. Деформация разделительной диафрагмы дополнительной камеры 23 под действием давления сжатого газа обеспечивает открытие обратного клапана 28 и резкое повышение давления жидкости в герметичном корпусе 1. Остаток воздуха из герметичного корпуса 1 стравливается через предохранительный клапан 30, после чего в герметичном корпусе 1 жидкость находится под начальным гидростатическим давлением, регулируемым редуктором 25.

Таким образом данный стенд позволяет проводить исследования в трех средах: в обычных условиях (при атмосферном давлении); под водой (при гидростатическом давлении); в разреженном пространстве (вакууме). Что значительно расширяет область использования стенда. 

Литература

1. Патент №2689958 Российская Федерация, МПК E02F 9/28(2006.01), G01N 3/58(2006.01). Универсальный стенд для исследования резания грунтов моделями рабочих органов землеройных машин : № 201812529 : заявл. 10.07. 2018 : опубликовано: 29.05.2019 / Дианов Х. А., Дианова Р.С., Дианова Д. Х.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ) . - 6 с. : ил. - Текст : непосредственный.

2. Авторское свидетельство №1302165 СССР, МПК G01M 15/02(2006.01), E02F 3/92(2006.01), G01M 15/00(2006.01). Стенд для исследования подводного резания грунтов : № 3979567 : заявл. 21.11.1985 : опубликовано : 07.04.1987 / И. А. Недорезов; В. И. Баловнев; Х. А. Дианов; Г. Н. Карасев: 07.04.1987 ; Московский автомобильно-дорожный институт и Всесоюзный научно-исследовательский институт транспортного строительства . - 4 с. - Текст непосредственный.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКОВ МЕТРОПОЛИТЕНА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОГО РАДИОКАНАЛА И ИНФРАКРАСНОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ



В.Г. Новиков



Л.Н. Логинова

Для совершенствования качества работы Московского метрополитена значительное внимание уделяется обеспечению безопасности движения поездов, улучшению показателей пропускной способности участков, а также эффективности использования технических средств.

Ключевые слова: Московский метрополитен, диспетчерская централизация, безопасность движения поездов, пропускная способность

EDN: CVSBIF

В статье рассматривается способ повышения пропускной способности линий Московского метрополитена за счет применения цифрового радиоканала и инфракрасного канала передачи данных на станции.

Пропускная способность линий Московского метрополитена и безопасность движения поездов на них в значительной степени зависят от применяемых технических средств управления движением поездов и способов интервального регулирования [1]. Вопросам безопасности движения и повышения пропускной способности Московского метрополитена посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов [2–6].

Тормозная система электропоезда метрополитена обеспечивает стабильную и необходимую величину

тормозного пути вне зависимости от количества пассажиров. Торможение, которое не вызывает заклинивание колесных пар, гарантирует остановку поезда при торможении системой автоматического регулирования скорости (АРС) по команде устройств автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости (АЛС-АРС) на расстоянии не более величин тормозных путей [7–9]. Величины тормозных путей при торможении системой АРС приведены в табл. 1.

Способ повышения пропускной способности заключается в том, что при помощи цифрового радиоканала и инфракрасного канала передачи данных, во время остановки на станции на поезд передается информация о том, что выходной светофор может быть открыт раньше, чем он открывается действующими устрой-

Новиков Вячеслав Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: управление в технических системах, системы обеспечения движения поездов, управление проектами. Автор 33 научных работ, в том числе трех учебников. Имеет три патента на изобретения.

Логинова Людмила Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: интеллектуальные системы управления движением поездов, системы автоведения поездов, высшее образование, современные технологии разработки программных продуктов, операционные системы, автоматизированные системы управления, контроля, разработка прикладных программ для ПЛК, SCADA системы, автоматизация проектирования, городской рельсовый транспорт, моделирование систем. Автор 61 научной работы.

Таблица 1

Величина тормозного пути при торможении APC

Скорость в начале торможения, км/ч	Величина тормозного пути при торможении APC (с момента превышения скорости), м												
	Профиль пути, ‰												
	60	50	40	30	20	10	0	–10	–20	–30	–40	–50	–60
90	294	296	303	317	334	360	388	424	461	526	600	695	794
85	271	272	281	293	309	325	354	380	416	474	580	646	725
80	248	250	260	270	284	289	320	335	370	422	561	599	659
75	222	226	235	245	255	262	283	306	340	381	490	531	591
70	196	202	210	219	225	235	243	278	308	340	418	462	524
65	176	181	188	195	200	208	219	241	266	292	341	395	447
60	157	160	164	169	174	181	194	203	224	244	264	334	371
55	138	141	147	151	155	162	172	182	199	215	234	295	326
50	121	122	129	132	136	142	149	159	173	187	206	257	282
45	102	104	112	114	118	123	127	137	148	159	176	220	239
40	83	85	94	96	99	103	105	115	122	130	146	181	194
35	71	74	81	82	85	87	97	100	106	114	127	159	170
30	59	62	66	68	71	73	77	84	90	96	106	135	144
20	56	58	59	60	61	62	70	74	76	81	85	99	115

ствами электрической централизации и при этом будет сохраняться безопасный интервал между поездами.

Обмен данными между станцией и поездом в районе станции происходит с помощью модулей мобильной связи (ММС), которые являются средствами обмена данными (см. рис. 1), один модуль расположен в кабине машиниста, а второй — на станции у знака «Остановка головного вагона» [9].

ММС обеспечивает передачу данных по двум каналам: инфракрасному на расстоянии не более 15 метров при скорости передачи 57600 Бод, радиоканалу на частоте 434 МГц на расстоянии до 49 метров при скорости передачи 19200 Бод.

ММС, установленный на станции, при отсутствии поезда работает в режиме передачи поезвному модулю. Если поезд находится в радиусе приема, то ММС принимает данные, обрабатывает и передает по межмодульному интерфейсу на наборный многофункциональный пульт (ПНМ) в кабине поезда. Далее ММС инфракрасного и радиоканала переходят в режим приема и передают данные с поезда на линейный пункт станции.

ПНМ предназначен для введения данных поезда и обмена информацией между устройствами поездной автоматики и устройствами обеспечения безопасности движения.

Сообщения радиоканала имеют как информационную, так и адресную часть. Если адрес сообщения с линейного пункта станции совпадает с номером пути, на котором находится поезд, то данные будут переданы на поезд.

Инфракрасный канал является дублирующим и имеет только информационную составляющую в сообщении, так как может передавать данные только поезду, который находится непосредственно у места установки станционного ММС.

Для расчета эффективности данного способа сокращения межпоездного интервала рассмотрим участок «Селигерская—Верхние Лихоборы» Люблинско-Дмитровской линии Московского метрополитена.

Определим тормозной путь системой APC от светофора 221М (рис. 2) по табл. 1.

На рис. 3 представлена схема торможения с реальными уклонами на рассматриваемом участке, а также кривые торможения, рассчитанные с помощью данных табл. 1.

Определим, в каком диапазоне скоростей будет двигаться поезд на расстоянии l_{-10} от светофора (l_{-10} — это расстояние от светофора 221М до границы изменения профиля линии, см. рис. 3) для этого найдем длину тормозного пути от данной точки до полной остановки поезда l_{T70}^{-10} ; она равна разности тормоз-

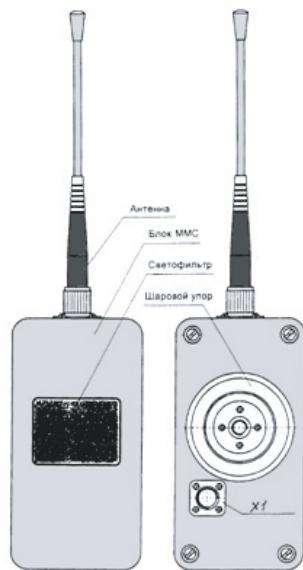


Рис. 1. Внешний вид MMC

ного пути поезда от скорости 70 км/ч до полной остановки при спуске с уклоном 10 промилле — l_{70}^{-10} (по табл. 1 находим ее, она составляет 278 метров) и расстояния l_{-10} , получим $l_{70}^{-10} = l_{70}^{-10} - l_{-10} = 278 - 117,5 = 160,5$ м. По табл. 1 находим, что данная точка находится между скоростями 50 и 55 км/ч.

Так как поезд движется по уклону вниз, то из соображений безопасности берем точку 55 км/ч как начальное значение второй кривой 43 промилле и принимаем значение —50 промилле, так как —43 нет

в табл. 1. Реальными уклонами являются —3 и —43, но поскольку для этих уклонов отсутствуют расчетные тормозные пути, мы можем из табл. 1 взять расчетные значения для профилей —10 и —50, не нарушая при этом условия безопасности движения.

Исходя из табл. 1, для точки 55 км/ч и при профиле пути в —50 промилле величина тормозного пути составляет $l_{55-0}^{-50} = 295$ м.

Величина тормозного пути со скорости 70 км/ч до скорости 55 км/ч на профиле пути —10 промилле составляет $l_{70-55}^{-10} = l_{70}^{-10} - l_{55}^{-10} = 278 - 182 = 96$ м.

Общая длина тормозного пути составляет $l_1 = l_{70-55}^{-10} + l_{55-0}^{-50} = 96 + 295 = 391$ м.

Пока поезд стоит на станции, он обменивается данными с системой диспетчерской централизации (ДЦ) по MMC, рис. 1. По этому каналу идет передача на поезд информации о том, что выходной светофор может быть открыт раньше, за счет этого идет сокращение межпоездного интервала.

Пропускная способность участка N определяется числом поездов, которые могут проследовать по этому участку за 1 час [10].

Пропускная способность участка зависит:

- от разрешенной и фактической скорости движения поездов;
- расчетного межпоездного интервала между попутно следующими поездами;
- времени срабатывания устройств обеспечения безопасности, времени реакции машиниста на сигнальные показания светофора и автоматической локомотивной сигнализации.

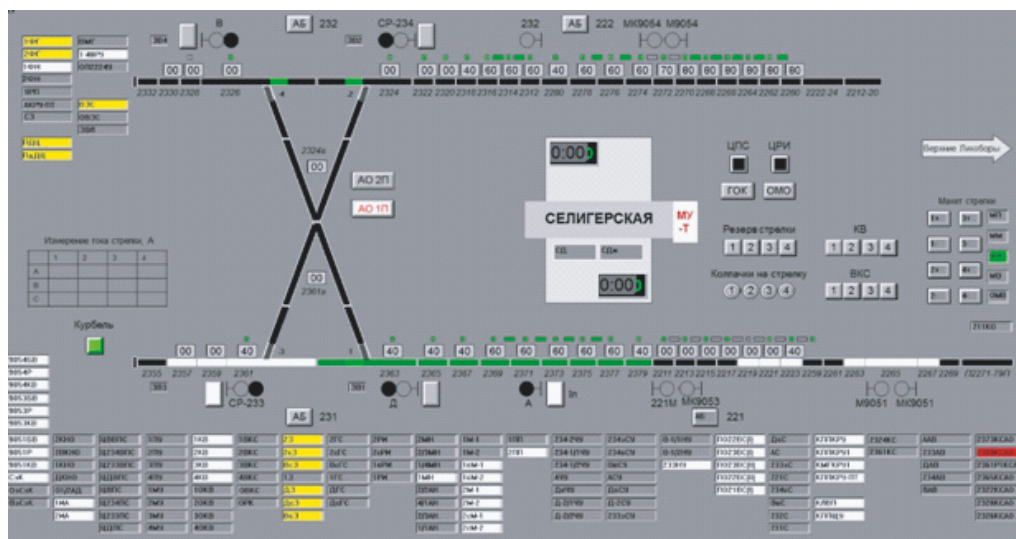


Рис. 2. Мнемосхема АРМ станции «Селигерская»

Для определения пропускной способности необходимо рассчитать интервал времени между попутно следующими поездами $T_{ИР}$.

При расчете $T_{ИР}$ необходимо учитывать время проследования поездом безопасного межпоездного интервала $T_{МПР}$:

$$T_{МПР} = \frac{L_{МПР}}{V}, \quad (1)$$

где $L_{МПР}$ — безопасный межпоездный интервал, принимаемый, исходя из требований безопасности и обеспечения условий режима ведения поезда, равных суммарной длине блок-участков и защитных участков, в этом случае машинист всегда будет следовать по разрешающему показанию светофора.

При определении безопасного межпоездного интервала необходимо учитывать длину поезда.

С учетом изложенного $T_{МПР}$ будет равно:

$$T_{МПР} = \sum_{i=1}^n \frac{L_{Б\Delta i}}{V_{Б\Delta i}} + \frac{L_{П}}{V_{Б\Delta}}, \quad (2)$$

где $L_{Б\Delta i}$ — длина проследуемого блок-участка, м;

$L_{П}$ — длина поезда, м;

$V_{Б\Delta i}$ — допустимая скорость на проследуемом блок-участке, м/сек.

Время реакции и восприятия машинистом сигнальных показаний светофоров и автоматической локомотивной сигнализации $t_{Б} = 2$ с; время срабатывания устройств обеспечения безопасности в момент изменения сигнальных показаний светофора $t_{СП} = 3$ с; резервное время, необходимое для выполнения гра-

фика движения поездов на перегоне $t_{РЕЗ} = 15$ с; на подходе к станциям $t_{РЕЗ} = 4$ с; время стоянки $T_{СТ} = 25$ с.

Таким образом, интервал времени между попутно следующими поездами $T_{ИР}$ составит:

$$T_{ИР} = T_{МПР} + t_{Б} + t_{СП} + t_{РЕЗ} + T_{СТ}. \quad (3)$$

Пропускная способность определяется по формуле:

$$N = \frac{3600}{T_{ИР}}. \quad (4)$$

Сильное влияние на пропускную способность оказывают остановка поездов на станциях, а также посадка и высадка пассажиров.

Для расчета пропускной способности после светофора 221М воспользуемся формулами (1–4) и данными табл. 2.

Длина поезда составляет 160 метров, допустимая скорость, с которой поезд проследует рельсовые цепи 2261 и 2263, составляет 70 км/ч.

Найдем межпоездный интервал при движении поезда от рельсовой цепи 2211 до 2259 при движении с допустимой скоростью:

$$T_{МПР} = \left(\begin{array}{l} 0,05 + 0,05 + 0,06 + \\ + 0,07 + 0,11 + 0,12 + \\ + 0,12 + 0,12 + 0,16 \\ \hline 70 + 80 + 80 + 80 + \\ + 80 + 80 + 80 + 70 + 70 \end{array} \right) 3600 = 40,82143 \text{ с.}$$

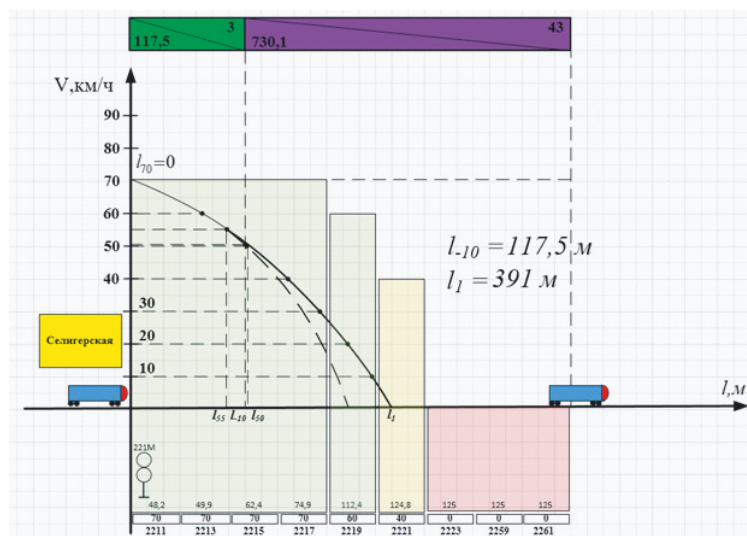


Рис. 3. Схема торможения APC от светофора 221М

Таблица 2

Данные для расчета пропускной способности при работе действующей системы

Номер рельсовой цепи	2211	2213	2215	2217	2219	2221	2223	2259
Длина б/у, км	0,05	0,05	0,06	0,07	0,11	0,12	0,12	0,12
Скорость, км/ч	70	80	80	80	80	80	80	70

Таблица 3

Результаты расчета

$T_{\text{МПР}}$	40,82143	с
$t_{\text{В}}$	4	с
$t_{\text{СП}}$	3	с
$t_{\text{РЕЗ}}$	4	с
$T_{\text{СТ}}$	25	с
$T_{\text{ИР}}$	76,82	с
N	46	Пар поездов в час

Далее определим расчетный интервал времени между попутно следующими поездами, который состоит из времени реакции и восприятия машинистом сигнальных показаний светофоров и автоматической локомотивной сигнализации $t_{\text{В}}=4$ с и времени срабатывания устройств обеспечения безопасности, в момент изменения сигнальных показаний светофора, когда происходит изменение сигнальных показаний светофора $t_{\text{СП}}=3$ с, резервного времени, необходимого для выполнения графика движения поездов $t_{\text{РЕЗ}}=15$ с на перегоне.

$$T_{\text{ИР}} = T_{\text{МПР}} + t_{\text{В}} + t_{\text{СП}} + t_{\text{РЕЗ}} + T_{\text{СТ}} =$$

$$= 40,82143 + 4 + 3 + 4 + 25 = 76,82 \text{ с.}$$

Пропускная способность будет равна:

$$N = \frac{3600}{T_{\text{ИР}}} = \frac{3600}{76,82} = 46.$$

Данные и результаты расчета сведены в табл. 3.

Пропускная способность, рассчитанная для данных АЛС-АРС (см. табл. 3), составляет 46 пар поездов в час.

Теперь проведем расчет для случая, когда система ДЦ передает на поезд информацию о том, что выходной светофор 221М может быть открыт раньше (тогда, когда освободится рельсовая цепь 2223).

Табл. 2 примет вид, приведенный в табл. 4.

Найдем межпоездной интервал при движении поезда с допустимой скоростью от рельсовой цепи 2211 до 2259:

$$T_{\text{МПР}} = \left(\frac{0,05 + 0,05 + 0,06 + 0,07 + 0,11 + 0,12 + 0,12 + 0 + 0,16}{70 + 80 + 80 + 80 + 80 + 80 + 80 + 70} \right) 3600 = 34,65 \text{ с}$$

Далее определим расчетный интервал времени между попутно следующими поездами.

$$T_{\text{ИР}} = T_{\text{МПР}} + t_{\text{В}} + t_{\text{СП}} + t_{\text{РЕЗ}} + T_{\text{СТ}} =$$

$$= 34,65 + 4 + 3 + 4 + 25 = 70,65 \text{ с.}$$

Пропускная способность будет равна:

$$N = \frac{3600}{T_{\text{ИР}}} = \frac{3600}{70,65} = 50.$$

Данные и результаты расчета сведены в табл. 5.

При помощи цифрового радиоканала и инфракрасного канала передачи данных во время остановки на станции «Селигерская» на поезд передается информацию о том, что выходной светофор 221М может быть открыт раньше, чем он открывается действующими устройствами электрической централизации и при этом будет сохраняться безопасный интервал между поездами.

Таблица 4

Данные для расчета пропускной способности при сокращенном интервале следования

Номер рельсовой цепи	2211	2213	2215	2217	2219	2221	2223	2259
Длина б/у, км	0,05	0,05	0,06	0,07	0,11	0,12	0,12	0
Скорость, км/ч	70	80	80	80	80	80	80	70

Таблица 5

Результаты расчета

$T_{МПР}$	34,65	с
t_B	4	с
$t_{СП}$	3	с
$t_{РЕЗ}$	4	с
$T_{СТ}$	25	с
$T_{ИР}$	70,65	с
N	50	Пар поездов в час

Расчетная пропускная способность за счет сокращения межпоездного интервала может быть увеличена с 46 до 50 пар поездов в час или на 8%.

Заключение

Предложенный способ повышения пропускной способности линий Московского метрополитена за счет применения цифрового радиоканала и инфракрасного канала передачи данных на станции позволит сократить межпоездной интервал движения поездов на 8 % и обеспечить при этом безопасность движения поездов. 

Литература

1. Об утверждении Правил технической эксплуатации метрополитена в городе Москве : постановление Правительства Москвы от 28 апреля 2020 года № 468-ПП . - Текст : электронный : сайт . - URL : <https://docs.cntd.ru/document/564855465?ysclid=lo4b37bxu7533972354> (дата обращения 24.10.2023).
2. Metro train operation control algorithms with regulation restrictions adaptive to system state changes / L. A. Baranov, E. P. Balakina, L. N. Loginova, P. Vorobiev // 2014 11th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, CCE 2014 : 11, Ciudad del Carmen, 29 сентября 2014 года. - Ciudad del Carmen, 2014. - P. 6978283. - DOI 10.1109/ICEEE.2014.6978283.
3. Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова . - Текст : непосредственный // Надежность. - 2021. - Т. 21, № 2. - С. 17-23. - DOI 10.21-683/1729-2646-2021-21-2-17-23.
4. Сафронов, А. И. Особенности планирования безопасного перевозочного процесса на Московском метрополитене при учёте специфики работы электродепо «Красная Пресня» Кольцевой линии / А. И. Сафронов . - Текст : непосредственный // Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XXVIII международной конференции, Москва, 16 декабря 2020 года ; под общей редакцией А.О. Калашникова, В.В. Кульбы. - Москва: Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, 2020. - С. 308-314. - DOI 10.25728/icss.2020.18.45.055.

5. Построение архитектуры интеллектуальной системы управления городской рельсовой транспортной системой / В. М. Алексеев, Л. А. Баранов, М. А. Кулагин, В. Г. Сидоренко . - Текст : непосредственный // Мир транспорта. - 2021. - Т. 19 , № 1(92). - С. 18-46. - DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-1-18-46.
6. Баранов, Л. А. Потенциальная оценка пропускной способности железнодорожных линий по системам безопасности / Л.А. Баранов . - Текст : непосредственный // Сборник докладов 7-й международной научно-технической конференции ЮЖЕЛ - 2000. - Югославия , 2000. - С. 43-48.
7. Инструкция по сигнализации на метрополитенах Российской Федерации / Г.И. Минаев , С.Б. Сухов, А.Г. Федоров , М.В. Фурсаев , С.Н. Мизгирев . - Москва : ТА Инжиниринг, 2003. - 96 с. - Текст : непосредственный.
8. Диспетчерская централизация Московского метрополитена: учебное пособие / В.Г. Новиков , А.И. Сафронов , А.Ю. Ярославцев , А.А. Валвенкин , Б.В. Горелышев , В.П. Зосимов . - Москва : РУТ (МИИТ), 2019. - 131 с. - Текст : непосредственный.
9. Махмутов , К.М. Устройства интервального регулирования движения поездов на метрополитене / К. М. Махмутов . - Москва : Транспорт, 1986. - 351 с. - Текст : непосредственный.
10. Логинов , Г.И. Устройства автоматики, телемеханики движения поездов: учебное пособие для подготовки дежурных по посту централизации Московского метрополитена / Г.И. Логинов . - Москва : Учебно-производственный центр Московского метрополитена, 2006. - 144 с. - Текст : непосредственный.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Обоснован вид оптимизационной модели и форма решения с учетом специфики электропотребления на железнодорожном транспорте. Первоначально сформулированная задача нелинейного программирования сводится к линейной. Получен результат ее решения в виде профиля нагрузки выбранного объекта регулирования для рабочих и нерабочих интервалов времени.

Ключевые слова: обратная задача, линейное программирование, управляющее воздействие, электропотребление, оптимизация

EDN: DMHULG



В.А. Бугреев



С.Б. Мухамбетов

Оптимизационные задачи в электроэнергетике находят в настоящее время широкое применение. Особый интерес представляют задачи, связанные с проблематикой функционирования электроэнергетических систем и объектов в условиях внешних ограничений, которые могут иметь экономическую подоплеку. Как правило, рассматривают три этапа контроля и управления, что отмечается в работе [1]:

1. Прогнозирование в предаварийных условиях.
2. Адаптивное управление в аварийных ситуациях.
3. Корректирующее управление в послеаварийных условиях.

В [2] и [3] применительно к проблеме противодействия каскадному распространению аварийных ситуаций в энергетических системах обсуждают согласованное иерархическое управление и особо подчеркивают роль искусственного интеллекта в повышении эффективности управления.

При выявлении перспективных направлений развития принципов управления и реализации системы управления, в них используются:

- системы мониторинга, защиты и управления;
- идеология, реализованная на основе векторных измерений переменных состояния электроэнергетических систем;

Бугреев Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрификация и электроснабжение» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: надежность сложных технических систем. Автор более 80 научных работ, в том числе трех монографий. Имеет 16 патентов на изобретения.

Мухамбетов Серк Балтаваевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина. Область научных интересов: управление режимом электропотребления в сложных электроэнергетических системах, моделирование режимов работы электроэнергетических систем, теория систем и системный анализ для электроэнергетиков. Автор 20 научных работ.

Чехов Антон Павлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрификация и электроснабжение» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: электрические машины, информационные технологии в производстве. Автор 48 научных работ, в том числе двух монографий и семи учебных пособий. Имеет три патента на изобретения.

Новиков Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрификация и электроснабжение» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: надежность, информационные технологии. Автор 47 научных работ, в том числе пяти учебных пособий.

- передача данных;
- средства обработки и визуализации информации для контроля текущих условий эксплуатации;
- адаптивные методы генерации управляющих воздействий.

Авторы [4] основное внимание уделяют уменьшению общего электропотребления в базовом цехе путем изменения последовательности обработки деталей на каждом станке.

Задачи оптимизации в области электроэнергетики и эффективного управления ресурсами для промышленных предприятий, жилых зданий и коммунальных объектов рассмотрены в статьях [5;6] и многих других авторов. В этих работах предложены алгоритмы управления электропотреблением выбранных регулируемых потребителей, учтен ущерб от проведения управляющих воздействий, но не учтены области снижения электропотребления при которых у потребителя отсутствует ущерб.

Многие исследования пытаются смоделировать, проанализировать и оптимизировать потребление энергии железными дорогами. Существует большое разнообразие методов, приемов и подходов к формулированию и решению этой проблемы. Рядом авторов [7;8] сделан обзор методов моделирования и оптимизации потребления электроэнергии на железнодорожном транспорте. Анализируются две основные области: методы моделирования, используемые для моделирования движения поездов и потребления энергии и методы оптимизации, используемые для повышения эффективности движения поездов по электрифицированному участку. Таким образом, в большинстве работ решаются задачи оптимизации электропотребления только на тягу поездов, не затрагивая других участников потребления электрической энергии на участке.

В работе [9] при моделировании учитываются все энергетические игроки, такие как железнодорожный подвижной состав, объекты инфраструктуры и раздельные пункты. Разработанные алгоритмы предложены для демонстрации архитектуры системы энергоменеджмента железной дороги. Оптимизация выполняется по различным целям: оптимизация затрат или оптимизация энергопотребления. Видно, что данная модель учитывает все направления эксплуатационной деятельности железной дороги и является более полной по сравнению с моделями, учитывающими только тягу поездов.

Заметим, что можно условно выделить технологические инженерные модели и эконометрические эмпирические исследования, что также отмечается в [10].

При этом, помимо разнообразия критериев оптимизации, различают форму постановки оптимизационной задачи и ее решения.

К примеру, точка зрения на повышение уровня надежности в случае ограничения ресурсов, которые выделяются на техническое обслуживание, предложена в статье [11].

Обратной по отношению к ней является задача, рассмотренная в [12]. Здесь минимизируются затраты при которых достигается определенный уровень надежности.

Для решения подобного рода задач используется динамическое программирование.

Для прямой задачи в качестве целевой функции (критерия) берутся показатели надежности, а в качестве ограничений используются ресурсы, выделяемые на техническое обслуживание объекта.

В обратной задаче, наоборот, в качестве целевой функции используют суммарные затраты, а уровень надежности электроснабжения выступает в качестве ограничений.

Бывают прямые и обратные оптимизационные задачи технологического типа. К примеру, при проектировании осветительных установок прямой задачей будет задача нахождения оптимального количества (мощности) и расположения светильников в производственном помещении. В случае обратной задачи, рассмотренной В.Д. Никитиным [13], необходимо, исходя из конфигурации осветительной сети, найти оптимальный уровень освещенности.

В некоторых статьях обсуждаются обратные задачи комбинаторной оптимизации.

В этих задачах дается допустимое решение X , которое не является оптимальным решением в текущих условиях. Требуется пересмотреть коэффициенты затрат так, что X становится оптимальным решением.

Основное применение этих проблем, как объясняется в [14;15], состоит в том, что в некоторых случаях, хотя установлена оптимизационная модель, затраты связанные с переменными решения в модели, очень трудно определить точно. Если опытным путем оптимальное решение становится известным, то можно скорректировать целевую функцию, такой вывод сделан в научной публикации [16].

Отметим, что в этих научных работах рассматривается обратная оптимизационная задача линейного программирования и приводятся примеры решения подобных задач. Здесь минимизацией коэффициентов целевой функции достигают оптимального значения одного из допустимых векторов.

Авторами работы [17] показано, что обратную задачу линейного программирования можно свести к

минимизации выпуклой кусочно-квадратичной функции используя евклидову норму. Подобные задачи достаточно просто решаются с помощью обобщенного метода Ньютона, отмечается в статьях [18–20].

Таким образом, оптимизация электропотребления для железнодорожного транспорта должна учитывать специфику и структуру потребления на железнодорожном транспорте и эта задача должна быть сведена к обратной задаче линейного программирования, решение которой рассмотрено в работах, указанных выше [14;15].

Структура системы электроснабжения на железнодорожном транспорте включает в себя тяговые подстанции, сети питания электроподвижного состава (ЭПС), а также питания железнодорожных потребителей, занимающихся эксплуатационной и непрофильной деятельностью. Кроме того, эта система обеспечивает электроэнергией и сторонних потребителей, включая население [21].

В соответствии с [22;23], пространство возможных состояний системы электроснабжения $X(1)$ характеризуется параметрами:

$$X = (W_{11}, \dots, W_{ij}, \Delta W, d_{11}, \dots, d_{m,n}), x \in X, \quad (1)$$

Здесь W_{ij} — потребление электрической энергии i -м потребителем на j -м уровне;

ΔW — величина отклонения объема электропотребления от заданной (договорной) величины;

d — экономический ущерб потребителя электрической энергии от проведения управляющих воздействий.

Следовательно, при проведении управляющих воздействий в отношении потребителей электрической энергии необходимо минимизировать:

- экономический ущерб потребителя, в отношении которого проводятся данные воздействия;
- величину штрафных санкций энергосистемы как в случае превышения величины договорного электропотребления, так и в случае сниженного электропотребления.

В качестве критерия оптимизации в нашем случае необходимо рассматривать снижение суммарного ущерба от проведении управляющих воздействий при ограничениях электропотребления. Отметим, что проведение управляющих воздействий с целью поддержания потребления электрической энергии в заданном диапазоне возможно только в отношении отдельных групп потребителей.

В работе [24] показано, что линейное программирование лучше всего подходит для решения обратных оптимизационных задач по сравнению с динамическим программированием.

Таким образом, целью данного исследования является постановка и решение задачи оптимизации элек-

тропотребления на железнодорожном транспорте с учетом ограничений. Для этого необходимо обосновать вид оптимизационной модели и форму решения с учетом специфики электропотребления на железнодорожном транспорте и типовой методики контроля и управления электропотреблением.

Исходя из сказанного выше, обратную задачу оптимизации электропотребления на заданном участке (по точке присоединения) принимаем с учетом следующего:

1. Со стороны внешней сети вводится лимит на электропотребление по точке присоединения.

2. В случае превышения лимита, а также недобора объема электропотребления вводятся штрафные санкции.

3. Управляющие воздействия можно проводить только в отношении железнодорожных потребителей (ранжированных по степени влияния на процесс перевозок, по видам экономической деятельности).

Пусть задана величина ограничения потребления электрической энергии в точке присоединения электрических сетей железнодорожного транспорта и сетей внешнего электроснабжения на каком-либо интервале времени T . Разбивая этот интервал на равные промежутки времени в каждый момент t_k прогнозируем электропотребление на момент t_N рассматриваемого интервала T .

Возможны следующие сценарии событий:

1. Прогноз в момент t_k показывает превышение лимита электропотребления и, соответственно, величину ущерба, которую понесет железная дорога в данной точке присоединения. В этом случае в отношении собственных железнодорожных потребителей необходимо проводить управляющие воздействия с целью снижения объемов электропотребления. В момент t_k проводится сравнение величины экономического ущерба от проведения управляющих воздействий или выплаты за превышение лимита электропотребления по точке присоединения.

2. Прогноз в момент t_k показывает, что превышения лимита электропотребления по данной точке присоединения нет. Следовательно, можно сохранять эксплуатационные показатели участка.

3. Прогноз в момент t_k показывает превышение лимита электропотребления над величиной прогнозируемого электропотребления. Следовательно, по данной точке присоединения есть потенциал увеличения эксплуатационной деятельности или необходимо корректировать величину лимита электропотребления. В этом случае сравниваются затраты на увеличение объемов эксплуатационной работы по участку и необходимости корректировки объемов электропотребления.

Таким образом, необходимо найти вектор $\bar{p}^{t_k}$ для заданного интервала времени, при котором суммарный ущерб по точке присоединения к внешней сети будет минимален.

В соответствии с этим, функция $F^{t_k}(\bar{p}^{t_k})$ (2) в первоначальной трактовке записывается в следующем виде:

$$F^{t_k}(\bar{p}^{t_k}) = F_1^{t_k}(\bar{p}^{t_k}) + F_2^{t_k}(\bar{p}^{t_k}) + F_3^{t_k}(\bar{p}^{t_k}). \quad (2)$$

Здесь $F_1^{t_k}(\bar{p}^{t_k})$ — экономический ущерб, который несет железнодорожный потребитель электроэнергии (осуществляет эксплуатационную деятельность) в результате принудительного снижения электропотребления; $F_2^{t_k}(\bar{p}^{t_k})$ — штрафные санкции для железной дороги (покупатель электроэнергии) за превышение лимитов электропотребления;

$F_3^{t_k}(\bar{p}^{t_k})$ — штрафные санкции для железной дороги (покупатель электроэнергии) за пониженное электропотребление.

Исходя из этого:

$$F_1^{t_k}(\bar{p}^{t_k}) = \sum_{j=1}^n K_j^{t_k} D_j^{t_k}(p_j^{t_k}), \quad (3)$$

$K_j^{t_k}$ — коэффициент ущерба;

$D_j^{t_k}(p_j^{t_k})$ — ущерб j -го потребителя, при уровне потребления активной мощности в момент t_k .

Запишем ущерб j -го потребителя (4) с учетом интервалов проведения управляющих воздействий:

$$D_j^{t_k}(p_j^{t_k}) = \sum_{l=k}^{N-1} \sum_{s=0}^{m_l} \int_{t_{ls}}^{t_{ls} + \tau_{ls}} d_j(p_j^{t_k}(\tau)) d\tau, \quad (4)$$

где $d_j(p_j^{t_k}(\tau))$ — функция единичного ущерба потребителя при заданном значении активной мощности на итерационном шаге;

τ — продолжительность временных интервалов, при которых возможен ущерб потребителя;

τ_{ls} — интервал проведения управляющих воздействий, при котором наблюдается максимум потребления активной мощности;

t_{ls} — интервал проведения управляющих воздействий, при котором наблюдается минимум потребления активной мощности.

Учитывая нелинейность изменения активной мощности в течение суток, в дальнейшем, используем средние ее значения для рабочих и нерабочих интервалов времени.

Здесь полагаем, что ущерб от ограничения электропотребления может быть только в рабочее время при достижении активной мощностью минимально допустимого значения, после которого потребитель начинает нести экономический ущерб.

Поэтому, единичную функцию ущерба (5) запишем в кусочно-линейном виде:

$$d_j(p) = \begin{cases} d_j^{\max} - \frac{d_j^{\max}}{p_j^{\min}} p = d_j^{\max} \left(1 - \frac{p}{p_j^{\min}} \right), & 0 \leq p \leq p_j^{\min} \\ 0, & p > p_j^{\min}. \end{cases} \quad (5)$$

В этой формуле:

$d_j^{\max}$ — максимальный единичный ущерб j -го потребителя;

$p_j^{\min}$ — минимально допустимое значение потребления активной мощности j -го потребителя, при котором ущерб отсутствует;

p — условная функция активной мощности на заданном временном интервале.

Такой вид единичной функции ущерба является упрощенной моделью реальной ситуации и позволяет в дальнейшем перейти к линейной оптимизации.

Суммарная функция ущерба за превышение лимитов электропотребления (6):

$$F_2^{t_k}(\bar{p}^{t_k}) = \alpha \left(\sum_{j=1}^n (\omega_j^{t_k} + W_j^{t_k}) + W_{tr}^{t_k} + W_S^{t_k} - (1 + \gamma) W^{\max} \right). \quad (6)$$

Здесь α — тариф за превышенный объем электропотребления; $\omega_j^{t_k}$ — заданное потребление электроэнергии на момент конца прогноза на элементарном шаге расчета (задается); $W_j^{t_k}$ — объем электропотребления железнодорожными потребителями занимающихся эксплуатационной деятельностью; $W_{tr}^{t_k}, W_S^{t_k}$ — объем тягового электропотребления и сторонними не железнодорожными потребителями соответственно; γ — допустимое отклонение от максимума электропотребления; $W^{\max}$ — величина максимального электропотребления на весь интервал времени.

Заданное потребление электроэнергии на момент конца прогноза (7) на элементарном шаге расчета в зависимости от изменения активной мощности:

$$\omega_j^{t_k} = \int_{t_0}^{t_N} p_j^{t_k}(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Очевидно, что сумма $\sum_{j=1}^n (\omega_j^{t_k} + W_j^{t_k})$ равна электро-

потреблению нетяговых железнодорожных потребителей на полном интервале $[t_0, t_N]$. Здесь учтено, что на оставшемся интервале времени $[t_k, t_N]$ остальные потребители используют лимитированный объем электроэнергии.

Рассмотрим суммарный ущерб от заниженного потребления электроэнергии (8):

$$F_3^{t_k}(\bar{p}^{t_k}) = \beta \left((1 - \gamma) W^{\max} - W_{tr}^{t_k} - W_S^{t_k} - \sum_{j=1}^n (\omega_j^{t_k} + W_j^{t_k}) \right). \quad (8)$$

где β — тариф (коэффициент) за недобраный объем электропотребления

С учетом разного электропотребления в рабочее и нерабочее время требуется выполнение неравенств:

$$(1 - K_j^{t_k}) p_j^{\min} \leq p_j^{t_k}(\tau) \leq p_j^{\max}, \quad (9)$$

$$p_{j,N}^{\min} \leq p_j^{t_k}(\tau) \leq p_{j,N}^{\max}. \quad (10)$$

Таким образом, обратная задача линейного программирования формулируется: требуется найти век-

тор-функцию $\bar{p}^{t_k}(\tau) = (p_1^{t_k}(\tau), \dots, p_n^{t_k}(\tau))$, $\tau \in [t_k, t_N]$, которая является решением упрощенной задачи (11):

$$F^{t_k}(\bar{p}^{t_k}) \rightarrow \min, \quad (11)$$

При этом, $\bar{p}^{t_k}(\tau) = (p_1^{t_k}(\tau), \dots, p_n^{t_k}(\tau))$ удовлетворяют (9) и (10).

В этом случае, формируется такой профиль нагрузки для группы потребителей на заданном интервале времени, при котором целевая функция минимизируется.

Для получения решения в явном виде необходимо учесть, что активная мощность потребителя изменяется в некотором диапазоне:

- τ_{ls} — интервал проведения управляющих воздействий, при котором наблюдается максимум потребления активной мощности;

- t_{ls} — интервал проведения управляющих воздействий, при котором наблюдается минимум потребления активной мощности.

Если $\bar{p}^{t_k}(\tau) = (p_1^{t_k}(\tau), \dots, p_n^{t_k}(\tau))$ являются нелинейными функциями, то данная задача является сложной. Но ее можно упростить. Для этого решение нужно представить в виде кусочно-постоянных функций:

$$p_j^{t_k}(\tau) \equiv A_{jl}^{t_k} = \text{const}, \quad (12)$$

$$p_j^{t_k}(\tau) \equiv B_{jl}^{t_k} = \text{const}. \quad (13)$$

На временных интервалах τ функции $p_j^{t_k}(\tau)$ считаем постоянными для рабочего и нерабочего времени (12,13). При этом необходимо различать интервалы проведения управляющих воздействий τ_{ls} , t_{ls} при максимуме и минимуме потребления активной мощности.

В рабочее и нерабочее время потребителя, отобранного для регулирования электропотребления на железнодорожном транспорте продолжительность этих интервалов будет различаться.

Учитывая (12) и (13), введем обозначения:

$$\bar{A}^{t_k} = (A_1^{t_k}, A_2^{t_k}, \dots, A_n^{t_k}), \bar{B}^{t_k} = (B_1^{t_k}, B_2^{t_k}, \dots, B_n^{t_k}), \quad (14)$$

$$F^{t_k}(\bar{p}^{t_k}) = F^{t_k}(\bar{A}^{t_k}, \bar{B}^{t_k}), \quad (15)$$

$$D_j^{t_k}(p_j^{t_k}) = D_j^{t_k}(A_j^{t_k}). \quad (16)$$

В этом случае целевая функция упрощается, и оптимизационная задача сводится к линейному виду:

$$F^{t_k}(\bar{A}^{t_k}, \bar{B}^{t_k}) \rightarrow \min, \quad (17)$$

$$(1 - K_j^{t_k}) p_j^{\min} \leq A_j^{t_k} \leq p_{j,F}^{\max}, j = \overline{1, n}, \quad (18)$$

$$p_{j,F}^{\min} \leq B_j^{t_k} \leq p_{j,F}^{\max}, j = \overline{1, n}, \quad (19)$$

где $p_j^{\min}$, $p_j^{\max}$ — минимальное и максимальное потребление активной мощности в рабочее время j -го потребителя;

$p_{j,F}^{\min}$, $p_{j,F}^{\max}$ — минимальное и максимальное потребление активной мощности в нерабочее время j -го потребителя.

Эти мощности являются кусочно-линейными функциями (14), что в дальнейшем позволяет с учетом обозначений (21–25) записать целевую функцию в виде (20).

Полная запись целевой функции (17) будет выглядеть следующим образом:

$$F^{t_k}(\bar{A}^{t_k}, \bar{B}^{t_k}) = F_1^{t_k}(\bar{A}^{t_k}, \bar{B}^{t_k}) + F_2^{t_k}(\bar{A}^{t_k}, \bar{B}^{t_k}) + F_3^{t_k}(\bar{A}^{t_k}, \bar{B}^{t_k}). \quad (20)$$

Здесь

$$F_1^{t_k}(\bar{A}^{t_k}, \bar{B}^{t_k}) = \sum_{j=1}^n K_j^{t_k} D_j^{t_k}(A_j^{t_k}), \quad (21)$$

$$D_j^{t_k}(A_j^{t_k}) = d_j(A_j^{t_k}) \sum_{l=k}^{N-1} \sum_{s=0}^{m_l} (\tau_{ls} - t_{ls}), \quad (22)$$

$$F_2^{t_k}(\bar{A}^{t_k}, \bar{B}^{t_k}) = \alpha \left(\sum_{j=1}^n (w_j^{t_k} + W_j^{t_k}) + W_{tr}^{t_k} + \left(W_S^{t_k} - (1 + \gamma) W^{\max} \right) \right), \quad (23)$$

$$F_3^{t_k}(\bar{A}^{t_k}, \bar{B}^{t_k}) = \beta \left((1 - \gamma) W^{\max} - W_{tr}^{t_k} - \left(-W_S^{t_k} - \sum_{j=1}^n (w_j^{t_k} + W_j^{t_k}) \right) \right), \quad (24)$$

$$w_j^{t_k} = A_j^{t_k} \left(\sum_{l=k}^{N-1} \sum_{s=0}^{m_l} (\tau_{ls} - t_{ls}) \right) + B_j^{t_k} \left(\sum_{l=k}^{N-1} \sum_{s=0}^{m_l-1} (t_{ls+1} - \tau_{ls}) \right). \quad (25)$$

Компоненты искомого решения теперь можно представить в виде: $\bar{p}^{t_k}(\tau) = (p_1^{t_k}(\tau), \dots, p_n^{t_k}(\tau))$, $\tau \in [t_k, t_N]$ используя формулы (12) и (13).

Некоторыми исследователями, например [22], при формулировании оптимизационной задачи вводится ряд дополнительных переменных и параметров. Это минимальные и максимальные значения активных мощностей, различные их значения для рабочего и нерабочего времени производственных объектов.

На начальном этапе подобные задачи рассматривают без учета ограничений.

Потом вводятся ограничения и на них проверяются результаты решения первоначальной задачи. Для записи ограничений используют симплекс-метод.

Оптимальным решением является решение, при котором достигается минимум целевой функции.

При этом управляющие воздействия производятся по всему массиву электроприемников. В этом случае происходит неглубокое снижение нагрузки (сохраняется выпуск продукции), что делает данный способ оптимизации труднореализуемым на краткосрочных периодах.

В данной работе применен аналогичный подход, но с учетом специфики потребления электроэнергии на железнодорожном транспорте. В работе рассматривается общее ограничение потребления электроэнергии по точке присоединения, без учета причины возникновения этого ограничения.

В написанной авторами статье учтена возможность глубокого снижения нагрузки (в т. ч. вывода из работы отдельных групп потребителей электроэнергии, относящихся к эксплуатационной деятельности железнодорожного транспорта) и введена кусочно-линейная функция ущерба.

В работе [25] решение обратной задачи заключается в поиске вместо исходного вектора некоторого нового вектора. Подобного рода задачи сводятся к задачам безусловной минимизации с помощью ряда упрощений.

В данной статье предлагается другой подход — задача сводится к задаче линейного программирования, упрощение которой является более простым, но минимизация в этом случае не является безусловной [3;26].

В этом случае в качестве переменных используются объемы электроэнергии по всем направлениям использования в точке присоединения. Важным элементом новизны являются положения о проведении управляющих воздействий только в отношении железнодорожных потребителей.

Исследованиями [27], а позднее [23], на экспериментальных данных проведена апробация поиска решения подобных задач оптимизации при меньшем количестве переменных. В данном случае наблюдается совпадение решения в виде формирования оптимальных графиков нагрузок в этих работах и представленной авторами статье в виде $\bar{p}^{t_k}(\tau) = (p_1^{t_k}(\tau), \dots, p_n^{t_k}(\tau))$. Следовательно, для решения задач оптимизации в подобной постановке этот метод решения является подходящим.

В статье представлен новый подход к оптимизации электропотребления в точке присоединения сетей железнодорожной электроэнергетики к внешним сетям. Подход применим ко многим моделям, и основан на преобразовании обратной оптимизационной задачи и дальнейшем ее решении. В результате исследования сформулирована обратная задача оптимизации электропотребления на железнодорожном транспорте в условиях ограничений (лимитов) электропотребления.

Этот подход был проиллюстрирован на модели точки присоединения с несколькими типами нагрузки: тяга поездов, железнодорожные эксплуатационные и сторонние потребители. Управляющие воздействия в условиях ограничений проводятся только в отношении железнодорожных потребителей. Решением оптимизационной задачи будет значение активной мощности в рабочее и нерабочее время на заданном временном интервале для выбранных электроэнергетических объектов железнодорожного транспорта.

Соответственно, будущие исследования должны преследовать несколько направлений: для повышения производительности алгоритма необходимо изучить сочетание подхода обратной оптимизации с методами стохастической оптимизации или выбора потребителей для регулирования с использованием методов машинного обучения. Кроме того, представляет интерес оценка предлагаемого подхода на более общих математических моделях и реальных измеренных данных. 

Литература

1. M. D. Ilic, H. Allen, W. Chapman, C. A. King, J. H. Lang and E. Litvinov, «Preventing Future Blackouts by Means of Enhanced Electric Power Systems Control: From Complexity to Order», in Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 11, pp. 1920-1941, Nov. 2005, doi: 10.1109/JPROC.2005.857496.
2. Fardanesh, B. Future trends in power system control. IEEE Comput. Appl. Power 2002, 15, 24-31.
3. Ruano, A.; Ge, S.S.; Guerra, T.M.; Lewis, F.L.; Principe, J.; Colnaric, M. Computational intelligence in control. In Proceedings of the 19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, 24-29 August 2014.
4. Ying Liua, Haibo Dongc, Niels Lohse, Sanja Petrovic, Nabil Gindyc An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops, Journal of Cleaner Production, Volume 65, 15 February 2014, Pages 87-96.
5. Федотов, А.И. Оптимизация затрат на электроэнергию для производств с продолжительным режимом работы / А.И. Федотов, Г.В. Вагапов. - Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. - 2010. - № 10. - С. 2-6.
6. Гольденблат, Б.И. Применение математического оптимального программирования для задач электро-снабжения промышленных предприятий / Б.И. Гольденблат. - Текст : непосредственный // Электричество. - 1971. - № 2. - С. 21-24.
7. P. M. Fernández, I. V. Sanchís, V. Yepes, R. Franco A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption. Journal of Cleaner Production, Volume 222, 10 June 2019, Pages 153-162.
8. Сидорова, Е. А. Управление энергопотреблением на тягу поездов за счет повышения эффективности функционирования автоматизированной системы обработки информации об энергозатратах локомотивов / Е. А. Сидорова, С. П. Железняк, С. О. Подгорная. - Текст : непосредственный // Известия Транссиба. - 2018. - № 4(36). - С. 142-150. - EDN: PXWUKI.
9. Huiru Zhang, Limin Jiab, Li Wang, Xin-yue Xu Energy consumption optimization of train operation for railway systems: Algorithm development and real-world case study, Journal of Cleaner Production, Volume 214, 20 March 2019, Pages 1024-1037.
10. Vallés M, Bello A, Reneses J, Frías P (2018) Probabilistic characterization of electricity consumer responsiveness to economic incentives. Appl Energy 216:296-310.
11. Цой, А.А. Максимум надежности распределительных сетей при ограниченных ресурсах на ТО / А.А. Цой. - Текст : непосредственный // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. - 2015. - Т.71, № 1. - С.87-95.
12. Терещук, В.С. Оптимизация ресурсобеспечения эксплуатационных нужд распределительных электросетей / В.С. Терещук, А.А. Цой. - Текст : непосредственный // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. - 2013. - № 4. - С.108-112.
13. Никитин, В.Д. Оптимизация выбора светораспределения и размещения светильников прямого света / В.Д. Никитин. - Текст : непосредственный // Светотехника. - 1988. - № 11. - С.10-14.
14. Ahuja, R.K. and J.B. Orlin, A fast algorithm for the inverse spanning tree problem, J. of Algorithms, 34, 177-193(2000).
15. D. Burton, B. Pulleyblank, and Ph. L. Toint «The inverse shortest paths problem with upper bounds on shortest paths costs». In Network Optimization, edited by P. Pardalos, D. W. Hearn, and W. H. Hager, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol. 450, pp. 156-171, 1997.
16. Zhang J., Liu Z. Calculating some inverse linear programming problems // J. Comput. Appl. Math. 1996. Vol. 72, issue 2. P. 261-273.
17. Амирханова, Г.А. Об одной обратной задаче линейного программирования / Г. А. Амирханова, А. И. Голиков, Ю. Г. Евтушенко. - Текст : непосредственный // Труды Института математики и механики УрО РАН. - 2015. - Т.21, №3. - С. 13-19.
18. Mangasarian O.L. A finite Newton method for classification // Optimizat. Meth. and Software. 2002, Vol. 17, № 5. P. 913- 930.
19. Mangasarian O.L. A Newton method for linear programming // J. Optim. Theory Appl. 2004. Vol. 121. P. 1-18.
20. Поляк, Б.Т. Метод Ньютона и его роль в оптимизации и вычислительной математике / Б.Т. Поляк. - Текст : непосредственный // Труды Института системного анализа Российской академии наук. - 2006. - Т. 28. - С.44-62.

21. Григорьева , Н. Н. Трансформация и регулирование энергетического бизнеса на железнодорожном транспорте: специальность 08.00.05 Экономика и управление народным хозяйством : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Григорьева Наталья Николаевна ; Сибирский государственный университет путей сообщения. - Новосибирск, 2010 . - 24 с . - Текст : непосредственный.
22. Миронов Д. А. Оптимизация расходов промышленного предприятия на оплату электроэнергии: постановка задачи, алгоритм решения, вычислительный эксперимент: специальность 08.00.13 Математические и инструментальные методы экономики : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Миронов Денис Александрович ; Пермский государственный университет . - Пермь, 2009. - 194 с. - Текст : непосредственный.
23. Рахмонов , И.У. Математические модели и алгоритмы оптимального управления нагрузкой электропотребителей / И.У. Рахмонов, К.М. Реймов . - Текст : непосредственный // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. - 2019 . - Т.62 , №6 . - С. 528-535 . - <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-528-535>.
24. Mohammad Atef, Carmen Gervet Optimal Allocation of Renewable Energy Parks: A Two-stage Optimization Model, April 2013 RAIRO - Operations Research 47(2).
25. G. Sravanthi P. Kovida Ramya K. Varalaxmi T. Dheeraj Kumar Penalty Reduction in Industrial Power Consumption by Employing APFC Unit, International Journal of Engineering and Technical Research V9(04), April 2020).
26. Волкова , И.О. Активный потребитель: задача оптимизации потребления электроэнергии и собственной генерации / И.О. Волкова , М.В. Губко , Е.А. Сальникова . - Текст : непосредственный // Проблемы управления. - 2013. - № 6. - С. 53-61.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

При нахождении остаточного срока службы изделия основной задачей, помимо определения функции отказа, является определение исходных данных для расчета. Ввиду этого не всегда удастся найти нужные параметры вследствие многофакторного разрушения изделия и отсутствия необходимых исследований в данной области. В настоящей работе рассмотрен альтернативный способ определения исходных данных для элементов с моделью надежности Рэлея.

Ключевые слова: пассажирский вагон, система обеспечения комфорта, ремонт, техническое обслуживание, устранение

EDN: KGYFES

При использовании метода определения остаточного ресурса пассажирского вагона на основе статистических данных помимо определения вероятности безотказной работы всех элементов и узлов, а также систем, необходимо правильно и достоверно определить исходные данные для дальнейших преобразований функций. В связи с этим можно выделить два метода, которые зависят от модели надежности, по которым эти элементы приходят в негодное состояние.

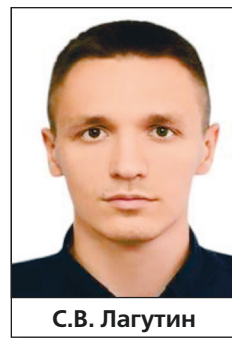
Вероятность безотказной работы (ВБР) для элементов и узлов, которые имеют экспоненциальную модель надежности (ЭМН), имеет следующий вид:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

где λ — интенсивность отказа.



Д.Г. Евсеев



С.В. Лагутин

Функция вероятности отказа для ЭМН представлена ниже:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

На рис. 1 представлены графики функции ВБР и вероятности отказа для элементов с ЭМН, на рис. 2 представлены графики функции плотности и интенсивности отказа для элементов с ЭМН.

Для определения численного значения или для дальнейшей постановки в системы уравнений необходимо и достаточно знать интенсивность отказа этих элементов (λ). Стоит отметить, что размерность данной величины должна быть обратно пропорциональна размерности среднего срока службы изделия, например: год⁻¹, месяц⁻¹, неделя⁻¹, сутки⁻¹, ч⁻¹ и т.д.

Евсеев Дмитрий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), Заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов: транспортное машиностроение, технология производства и ремонта подвижного состава. Автор более 250 научных работ, в том числе трех учебников, пяти монографий. Имеет более 40 патентов и авторских свидетельств на изобретения.

Лагутин Сергей Викторович, аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: эффективное использование пассажирских вагонов, методы расчетов остаточного ресурса пассажирских вагонов. Автор одной научной работы.

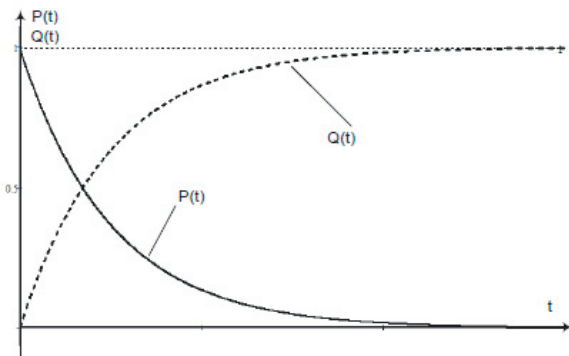


Рис. 1. Графики функции ВБР и вероятности отказа для элементов с ЭМН

Вероятность безотказной работы для элементов и узлов, которые имеют модель надежности Рэлея (МНР), имеет следующий вид:

$$P(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}},$$

где σ — параметр распределения.

Функция вероятности отказа для МНР представлена ниже:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}.$$

На рис. 3 представлены графики функции ВБР и вероятности отказа для элементов с МНР, на рис. 4 представлены графики функции плотности и интенсивности отказа для элементов с МНР.

Для определения численного значения или для дальнейшей их подстановки в системы уравнений необходимо и достаточно знать параметр распределения этих элементов (σ).

Для деталей, у которых выявлена коррозия и/или ползучесть материала, необходимо пользоваться следующим алгоритмом:

1. Определяем срок службы изделия из параметра коррозионной стойкости $T_{\text{корр.}}$.

2. Определяем срок службы изделия из параметра ползучести материала $T_{\text{полз.}}$.

3. Определяем срок службы изделия из параметра усталостной прочности $T_{\text{уст.}}$.

4. Находим наименьшее из этих трех параметров: $T_{\text{ср}} = \min\{T_{\text{корр.}}; T_{\text{полз.}}; T_{\text{уст.}}\}$.

5. Учитывая, что для элементов, имеющих модель надежности Рэлея, средний срок службы определяется по следующей формуле:

$$T_{\text{ср}} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}},$$

находим параметр распределения:

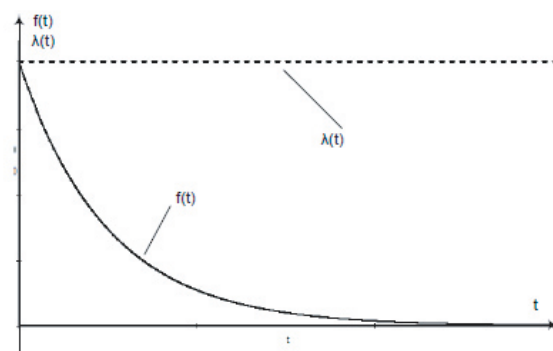


Рис. 2. Графики функции плотности и интенсивности отказа для элементов с ЭМН

$$\sigma = T_{\text{ср}} \sqrt{\frac{2}{\pi}}.$$

6. Определяем ВБР элемента:

$$P(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}.$$

Стоит отметить, что при продолжительной эксплуатации элементов с ЭМН и МНР ВБР и вероятность отказа принимают схожие значения соответственно (см. рис. 1 и 2). Ввиду этого можно сделать допущение, что при недостаточном количестве исходных данных для определения ВБР элементов с МНР при продолжительной эксплуатации в качестве исходных данных могут выступать значения интенсивности отказов этих элементов.

В таком случае при определении ВБР элементов с МНР следует руководствоваться следующим алгоритмом:

1. Определяем средний срок службы элемента, как при ЭМН:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda},$$

где λ — интенсивность отказа.

2. Определяем значение параметра распределения:

$$\sigma = T_{\text{ср}} \sqrt{\frac{2}{\pi}}.$$

3. Определяем ВБР элемента с МНР:

$$P(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}.$$

После определения ВБР всех элементов согласно блок-схемам надежности определяется обобщенная ВБР, которую впоследствии необходимо проинтегрировать для нахождения среднего срока службы системы.

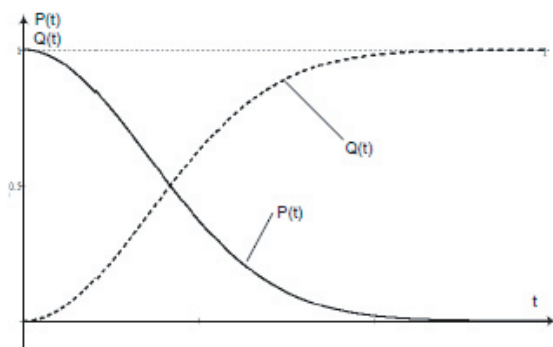


Рис. 3. Графики функции ВБР и вероятности отказа для элементов с МНР

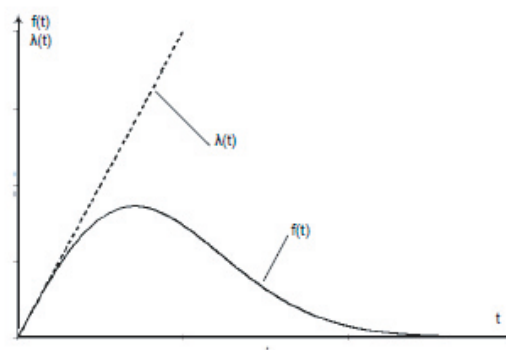


Рис. 4. Графики функции плотности и интенсивности отказа для элементов с МНР

Заключение

В ходе данного исследования рассмотрен метод определения исходных параметров для дальнейшего расчета пассажирского вагона при помощи статистических данных. Достаточным и необходимым условием для определения ВБР элементов с ЭМН является значение интенсивности отказа. Для определения ВБР элементов с МНР необходимо знать либо значение интенсивности отказа либо параметры, благодаря которым можно определить средний срок службы детали, подвергнувшейся коррозии, ползучести и усталостной работе. 

Литература

1. ГОСТ 33788—2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества = Freight and passenger railcars. Methods of testing structural strength and dynamic performance : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 июля 2016 г. № 856-ст : введен впервые : дата введения 2017-05-01 / Разработан Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»). - Москва : Стандартинформ, 2016. - 46 с. - Текст : непосредственный.
2. Коршунов, С. Д. Совершенствование метода оценки несущей способности и остаточного ресурса кузовов пассажирских вагонов после ремонта : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Коршунов Сергей Дмитриевич ; Брянский гос. техн. ун-т. - Брянск, 2014. - 171 с. - Текст : непосредственный.
3. Положение о продлении срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном сообщении. Утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от 21-22.10.2014 № 61. - Москва : ОАО «ВНИИЖТ», 2014. - 35 с. - Текст : непосредственный.
4. Теория надежности . Конспект лекций для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению 220400 «Управление в технических системах». - Томск : - Издательство Томского политехнического университета, 2015. - 83 с. - Текст : непосредственный.
5. Третьяков, А. В. Продление срока службы подвижного состава : монография / А. В. Третьяков. - Москва : Издательство МБА, 2011. - 304 с. - Текст : непосредственный.
6. РД 24.050.37—95 . Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. - Москва : ГосНИИВ, 1995. - Текст : непосредственный.
7. ЦЛ-201-2019 . Инструкция по сварке и наплавке узлов и деталей при ремонте пассажирских вагонов (приложение №53 к протоколу Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от 15-16 октября 2019 г. № 71). - Москва : АО «ВНИИЖТ», 2019. - 185 с. - Текст : непосредственный.

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЛЬСЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ НА ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕГО КОЛЕСА



А.А. Локтев



А.В. Сычева

Рассматривается взаимодействие колеса и рельса как решение задачи удара колеса сферической формы о рельс преимущественно в зоне стыка, представленной ортотропной пластиной, имеющей криволинейную анизотропию, на которую действует продольная сила и ударные воздействия в два момента. Приведены схемы ударного взаимодействия колеса и рельса в виде пластины Уфлянда-Миндлина и решение системы дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: колесо, рельс, напряжения, удар, анизотропия, пластины Уфлянда-Миндлина

EDN: XXKCAV

Актуальность задачи оценки влияния напряжений в рельсе железнодорожного пути на волновые процессы от воздействия на него колеса в том, что напряжения, имеющиеся на момент взаимодействия в рельсе, при описании взаимодействия колеса и рельса как правило не учитываются. Это приводит к погрешности при расчетах устойчивости и прочности пути. Особенно это важно при малых скоростях движения подвижного состава по участку пути. При этом следует отметить, что специфика железнодорожного пути оперативного развертывания [1–3] подразумевает особые условия эксплуатации, которые в классических расчетах не рассматриваются.

Модуль рельсовой нити железнодорожного пути оперативного развертывания, состоящий из мерного рельса, опирающегося на подрельсовое основание с

вязкоупругими характеристиками, в частности, содержащее пневматическую оболочку [4] требует иного подхода к оценке взаимодействия колеса и рельса. Ставится задача оценить устойчивость такого пути и возможность и скорость перемещения по этому пути подвижного состава без угрозы нарушения безопасности движения.

Математически задача ставится следующим образом: часть сферы (колесо) ударяет напряженную пластину с криволинейной анизотропией (рельс), при этом напряжение возникает от двух ударов колеса об рельс. Задачу динамического нагружения пути и его основания, предлагается представить в виде суперпозиции двух задач: динамического контакта колеса и рельса, посредством которого нагрузка передается от подвижного состава на объект линейной транс-

Локтев Алексей Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: механика деформированного тела, моделирование объектов транспортной инфраструктуры, железнодорожный путь, реконструкция объектов исторического и архитектурного наследия. Автор 191 научных работ, в том числе трех монографий.

Сычева Анна Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: инженерное обеспечение строительства, инженерная геология. Автор 58 научных работ.

Сычев Вячеслав Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: создание новых технологий и технических средств для повышения эффективности технического обслуживания железнодорожного пути. Автор 157 научных работ. Имеет 20 патентов на изобретения.

портной инфраструктуры и задачи деформирования конструкций железнодорожного пути с учетом стационарных и нестационарных процессов в них.

Решение оценки влияния напряжения в рельсе от воздействия силы основано на использовании известного асимптотического метода разложения неизвестных величин в ряды по полиномам Лежандра [5] и ряды Лорана [6] в точке воздействия колеса на рельс.

Функциональные коэффициенты которых, вблизи рассматриваемых точек конструкции предлагается представить в виде рядов Лорана, фактически представляющих собой разложения по малому параметру, что позволяет достичь требуемую точность определения параметров напряженно деформированного состояния конструкции в окрестности рассматриваемой точки. Такой подход в построении решения определяющих уравнений позволяет учесть влияние на конечные параметры деформирования конструкции пути предварительного и текущего напряжения в рельсовых плетях.

Известно упрощенное решение, при котором взаимодействие колеса и рельса как ударника и мишени [7;8] рассматривается для осесимметричного случая воздействия прогиба и угла поворота нормали к радиусу. Однако в этих работах не учитывается влияние ни растягивающей ни сжимающей силы в рельсе от воздействия подвижного состава.

Новизна предлагаемого решения в том, что ставится и решается задача определения зависимости влияния нагрузки колеса на рельс на скорость волны. Таким образом, задача оценки удара колеса об рельс, преимущественно в зоне стыкового соединения рельсов и получения зависимостей влияния силы контакта колеса и динамического прогиба при разных начальных напряжениях решается с помощью известной в

математике задачи оценки влияния изгибающего и крутящего моментов внешней продольной силы на скорость распространения продольных и поперечных упругих волн, образующихся после падения твердого сферического тела. Одним из вариантов решения задачи является попытка представить рельс как пластину Уфлянда-Миндлина [9].

На рис. 1 приведены схемы ударного взаимодействия колеса и рельса, объединенных с подрельсовым основанием в один узел, который представим в виде пластины Уфлянда-Миндлина [9].

Фронты упругих волн от воздействия колеса и рельса представим как цилиндры, поверхности которых перпендикулярны недеформированной срединной поверхности и представляют собой окружности, расширяющиеся с нормальными постоянными скоростями $G^{(\alpha)}$ как показано на рис. 1. Рассматриваются два вида волн: индекс α означает номер волны (1 — квазипродольная, 2 — квазипоперечная). Приняты следующие обозначения: $P(t)$ — сила взаимодействия между колесной парой и рельсом; Q_r — поперечная сила, действующая по контуру контактной области; α — местное смятие материалов колеса и рельса в зоне контакта; w — прогиб рельсовой плети между двумя соседними шпалами; w_1 — перемещение нижней грани рельса; w_2 — перемещение нижней грани шпалы.

Взаимодействие верхнего строения пути и подвижного состава представим волновыми уравнениями и учтем поперечный сдвиг и инерцию вращения поперечных сечений. Такое решение позволит моделировать процесс распространения упругих волн после удара.

Рассмотрим ортотропный плоский элемент, моделирующий конструкцию верхнего строения пути, тогда перемещение его точек определим из уравнений типа Уфлянда-Миндлина [9;10].

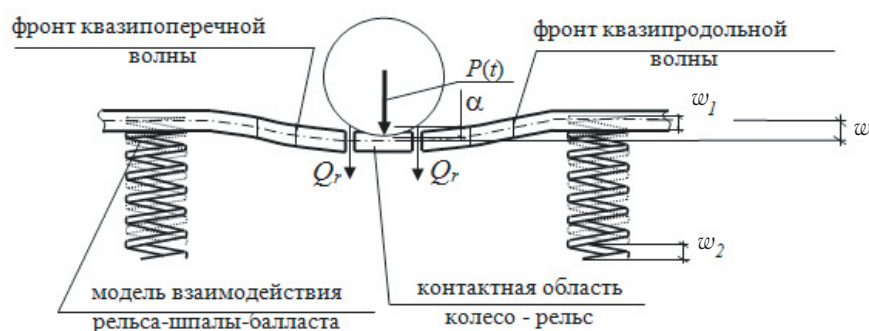


Рис. 1. Схема взаимодействия колеса и системы из рельсов-шпал-балласта

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 \alpha}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \alpha}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r^2} \frac{G^{(2)2}}{G^{(1)2}} \alpha + \frac{G^{(2)2} \sigma_r + G^{(3)2}}{G^{(1)2} r} \frac{\partial^2 \beta}{\partial r \partial \theta} - \frac{G^{(2)2} + G^{(3)2}}{G^{(1)2} r^2} \frac{\partial \alpha}{\partial \theta} + \\
& + \frac{12G^{(4)2}}{G^{(1)2}} \left(\frac{\partial \omega}{\partial r} - \alpha \right) = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \tau^2} + M + \frac{M_{rel} \Delta_r u}{G^{(1)2} h \rho}, \\
& \frac{G^{(4)2}}{G^{(1)2}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} - \frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) + \frac{G^{(4)2}}{G^{(1)2}} \left(\frac{\partial \omega}{r \partial r} - \frac{\alpha}{r} \right) + \frac{G^{(4)2}}{G^{(1)2}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{r^2 \partial \theta^2} - \frac{\partial \beta}{r \partial \theta} \right) = \frac{\partial^2 \omega}{\partial \tau^2} + q_1 \sin \alpha_1 + \frac{N \Delta_r \omega}{G^{(1)2} h^2 \rho}, \\
& \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{G^{(3)2}}{G^{(1)2} r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{G^{(2)2}}{G^{(1)2}} \frac{u}{r^2} + \frac{G^{(2)2} \sigma_r + G^{(3)2}}{G^{(1)2} r} \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} - \\
& - \frac{G^{(2)2} + G^{(3)2}}{G^{(1)2} r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + q_1 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \frac{N \Delta_r u}{G^{(1)2} h^2 \rho} + \frac{M_{rel} \Delta_r \alpha}{G^{(1)2} \rho}, \\
& \frac{G^{(2)2}}{G^{(1)2} r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{G^{(3)2}}{G^{(1)2}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) + \frac{\sigma_\theta + G^{(3)2}}{G^{(1)2} r} \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} + \\
& + \frac{G^{(2)2} + G^{(3)2}}{G^{(1)2} r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + q_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 + \frac{M_{ver} \Delta_\theta \beta}{G^{(1)2} \rho}, \\
& \frac{G^{(3)2}}{G^{(1)2}} \left(\frac{\partial^2 \beta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \beta}{\partial r} - \frac{\beta}{r^2} \right) + \frac{G^{(2)2}}{G^{(1)2} r^2} \frac{\partial^2 \beta}{\partial \theta^2} + \frac{\sigma_\theta + G^{(3)2}}{G^{(1)2} r} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial r \partial \theta} + \frac{G^{(2)2} + G^{(3)2}}{G^{(1)2} r^2} \frac{\partial \alpha}{\partial \theta} + \\
& + \frac{12G^{(5)2}}{G^{(1)2}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - \beta \right) = -\frac{\partial^2 \beta}{\partial \tau^2} + \frac{M_{ver} \Delta_\theta v}{G^{(1)2} h \rho},
\end{aligned} \tag{1}$$

здесь $\Delta_r = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right)$, $\Delta_\theta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$; N – продольная сила в радиальном направлении; M_{rel} – изгибающий момент, вектор которого направлен вдоль рельсовой нити; M_{ver} – крутящий момент, вектор которого направлен вдоль нормали к рельсошпальной решетке.

Для определения скоростей упругих волн от внешних сил продифференцируем уравнения (1) k раз по времени и примем условие совместности деформаций. Таким образом, решая полученную систему рекуррентных дифференциальных уравнений и принимая в (2) и (3) $k = -1, 0, 1, 2, 3$ находим скачки искомых величин с точностью до произвольных констант по формуле:

$$\left(1 - \frac{\rho G^2}{E'} \right) \omega_{(k+1)} = 2 \frac{\delta \omega_{(k)}}{\delta t} + Gr^{-1} \omega_{(k)} + bGX_{(k)} + F_{1(k-1)}, \tag{2}$$

$$\left(1 - \frac{\rho G^2}{K\mu} \right) X_{(k+1)} = 2 \frac{\delta X_{(k)}}{\delta t} + Gr^{-1} X_{(k)} - G\omega_{(k)} + F_{2(k-1)}, \tag{3}$$

где $\omega_{(k)} = [\beta_{r,(k+1)}]$, $X_{(k)} = [W_{(k)}]$, $b = K\mu h D^{-1}$, $r = r_0 + Gt$,

$$F_{1(k-1)} = -\frac{\delta^2 \omega_{(k-1)}}{\delta t^2} - Gr^{-1} \frac{\delta \omega_{(k-1)}}{\delta t} + G^2 r^{-2} \omega_{(k-1)} - bG \frac{\delta X_{(k-1)}}{\delta t} + bG^2 \omega_{(k-1)}, \tag{4}$$

$$F_{2(k-1)} = -\frac{\delta^2 X_{(k-1)}}{\delta t^2} - Gr^{-1} \frac{\delta X_{(k-1)}}{\delta t} + G \frac{\delta \omega_{(k-1)}}{\delta t} + G^2 r^{-1} \omega_{(k-1)}. \tag{5}$$

Получение независимых волновых характеристик от угла α возможно, если принять осесимметричное положение колеса и рельса и, как следствие, независимость волновых характеристик. Для достоверности решения задачи достаточно пяти членов лучевого ряда для искомых функций.

Для первой квазипродольной волны при $k = -1$, из (2) и (3) получим

$$\rho G^{(1)2} = E', \quad \omega_{(0)}^{(1)} \neq 0, \quad X_{(0)}^{(1)} = 0, \tag{6}$$

Для второй квазисдвиговой волны

$$\rho G^{(2)2} = K\mu, \quad X_{(0)}^{(2)} \neq 0, \quad \omega_{(0)}^{(2)} = 0. \quad (7)$$

Рекуррентное соотношение (2) интегрируем при $k=0$:

$$\omega_{(0)}^{(1)} = c_0^{(1)} r_1^{-1/2}, \quad (8)$$

тогда из (3) получим:

$$X_{(0)}^{(1)} = -\frac{c_0^{(1)}}{f} G^{(1)} r_1^{-1/2}, \quad (9)$$

где $f = 1 - E' K^{-1} \mu^{-1} = 1 - G^{(1)2} / G^{(2)2}$; $c_0^{(1)}$ — произвольная постоянная; $r_\alpha = G^{(\alpha)} t + r_0$ ($\alpha=1, 2$).

Аналогично для второго фронта упругой волны получаем:

$$X_{(0)}^{(2)} = c_0^{(2)} r_2^{-1/2}, \quad \omega_{(0)}^{(2)} = c_0^{(2)} \frac{b}{e} G^{(2)} r_2^{-1/2}. \quad (10)$$

Зависимости скоростей упругих волн от внешней продольной силы приведены на рис. 2 (по оси ординат $N/h^2 G^{(1)2} \rho$) при этом сила N практически не влияет на скорости продольных волн 1 и 2, связанных с перемещениями α, β , но существенно влияет на скорости поперечных волн 3, 4, 5. При увеличении внешней сжимающей продольной силы скорости поперечных волн запираются, уменьшаясь до нуля. При увеличении внешней растягивающей силы волны разгоняются, их скорости растут, а скорость пятой волны увеличивается до некоторого критического значения, определяемого свойствами материала верхнего строения пути.

Графические зависимости скоростей упругих волн от внешнего изгибающего момента M_{rel} , связанных с перемещениями u, v приведены на рис. 3. Как видно из рис. 3 при увеличении абсолютного значения момента M_{rel} поперечные волны запираются, а продольные волны практически не зависят от значения M_{rel} . Зависимость построена для $c_1 = G^{(1)2}$.

Графические зависимости скоростей упругих волн от внешнего крутящего момента приведены на рис. 4. Зависимость построена для $c_1 = G^{(1)2}$. Как видно из рис. 4, момент M_{ver} почти не влияет на скорости волн 3 и 5, а на скорости волн 1 и 2, напротив, оказывает существенное влияние, большее, чем продольная сила на скорость волны 4, связанной с прогибом рельса, причем на скорость распространения волны 4 они вовсе не влияют.

Результат решения системы уравнений, описанной выше, показан на рис. 2–4. Полученный результат решения системы уравнений представлен как зависимости $G^{(x)} = f(N, M_{rel}, M_{ver})$ от различных прикладываемых к рельсу усилий, причем иные возникающие при движении колеса на рельс динамические воздействия принимались равными единице.

Выводы

1. Внешняя продольная сила, действующая в радиальном направлении не влияет на скорость продольных волн, но существенно влияет на скорость поперечных волн.

2. Эффект запираения продольной волны в рельсе, детектируя который можно судить о близком предельном состоянии и оценить устойчивость рельса, выявлен при увеличении сжимающей продольной силы.

3. Эффект запираения поперечной волны в рельсе выявлен при увеличении изгибающего момента, при этом скорости продольных волн практически не зависят от его значения.

4. Эффект запираения продольных волн в рельсе зависит также от внешнего крутящего момента вызывает уменьшение скоростей этих волн, но практически

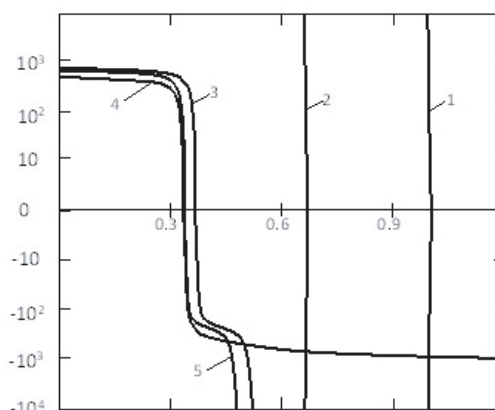


Рис. 2. Зависимость скоростей упругих волн от продольной силы N

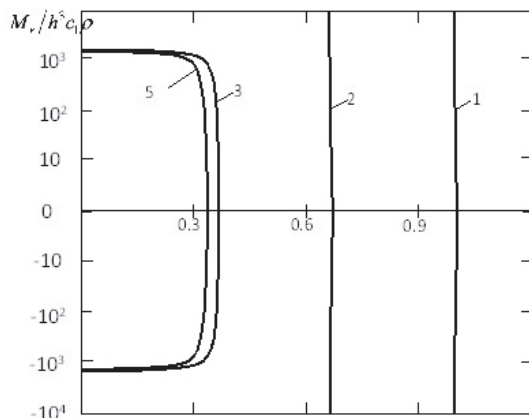


Рис. 3. Зависимость скоростей упругих волн от изгибающего момента M_{rel}

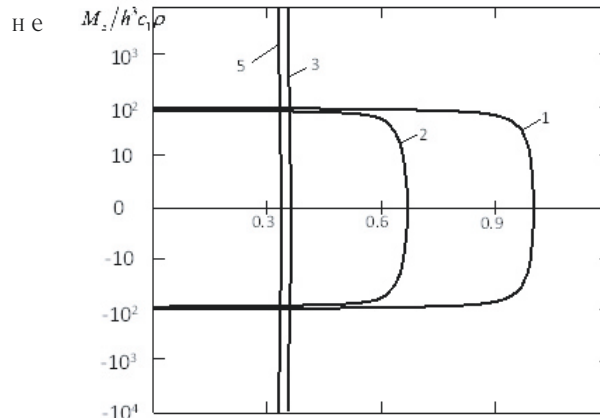


Рис. 4. Зависимость скоростей упругих волн от крутящего момента M_{ver}

влияет на скорости распространения поперечных волн.

5. Практическое применение полученных результатов в возможности оценки наличия группы негодных промежуточных рельсовых скреплений, что является одним из важных критериев назначения ремонтных работ железнодорожного пути. 

Литература

1. Оперативное развертывание железнодорожного пути в особых условиях / А.В. Сычёва, А.А. Локтев, В.В. Сычёв, Ю.А. Чистый, А.В. Потапов. - Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. - 2022. - № 12. - С. 20-22.
2. Патент № 2786891 Российская Федерация, МПК E01B 23/00 (2006.01), E01B 23/08 (2006.01). Подрельсовое устройство и способ оперативного восстановления рельсовой нити по уровню : № 2022119-094 : заявл. 13.07.2022 : опубликовано 26.12.2022 / В.П.Сычев ; Сычев Вячеслав Петрович. - 11 с. : ил. - Текст : непосредственный.
3. Патент № 2746554 Российская Федерация, МПК E01B 3/00(2006.01), E01B 3/20(2006.01), E01B 3/46(2006.01). Подрельсовое устройство железнодорожного пути и способ укладки по меньшей мере одного подрельсового устройства железнодорожного пути : № 2020124286 : заявл. 22.07.2020 : опубликовано 15.04.2021 / Сычев В.П., Локтев А.А., Сычева А.В., Кузнецова Н.В., Сычев П.В ; Общество с ограниченной ответственностью «Вагонпутьмашпроект». - 20 с. : ил. - Текст : непосредственный.
4. Патент № 2783010 Российская Федерация, МПК E01B 23/00 (2006.01), E01B 29/02 (2006.01), E01B 5/14 (2006.01), E01B 9/02 (2006.01). Модуль рельсовой колеи и способ его оперативной укладки : № 2022114221 : заявл. 25.05.2022 : опубликовано 08.11.2022 / В.П.Сычев ; Сычев Вячеслав Петрович. - 13 с. : ил. - Текст : непосредственный.
5. Свешников, А. Г. Лекции по математической физике : учебное пособие для вузов по направлению «Физика» и специальностям «Физика» и «Прикладная математика» / А. Г. Свешников, А. Н. Боголюбов, В. В. Кравцов. - Москва : Изд-во МГУ, 1993. - 351 с. - Текст : непосредственный.
6. Титчмарш, Эдуард Чарльз. Теория функций / Эдуард Чарльз Титчмарш ; перевод с английского В. А. Рохлина. - 2-е изд. - Москва : Наука, 1980. - 463 с. - Текст : непосредственный.
7. Товстик, П.Е. Колебания и устойчивость предварительно напряженной пластины, лежащей на упругом основании / П. Е. Товстик. - Текст : непосредственный // Прикладная математика и механика. - 2009. - Т. 73. Вып. 1. - С.106-120.

8. Коган, А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. - Москва : Транспорт, 1997. - 326 с. - Текст : непосредственный.
9. Уфлянд, Я.С. Распространение волн при поперечных колебаниях стержней и пластин / Я.С. Уфлянд. - Текст : непосредственный // Прикладная математика и механика. - 1948. - Т.12, №3. - С. 287-300.
10. Элишаков, И. Колебания асимптотически и вариационно основанных моделей пластин Уфлянда - Миндлина / И. Элишаков, Ф. Хаш, Н. Шалламель. - Текст : непосредственный // Международный журнал инженерных наук. - 2017. - Т. 116. - С. 58-73.
11. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V. A ray method of solving problems connected with a shock interaction // Acta Mechanica. - 1994. - Vol.102. - P.103-121.
12. Верификация математических моделей и проведение расчетов предельного состояния и эксплуатационного ресурса по комплексному показателю долговечности рельсов с учетом кодов дефектов 21.1;21.2;-53.1;69 / Д.В. Овчинников, В.А. Покацкий, А.Ю. Абдурашитов, П.В. Сычев. - Текст : непосредственный // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2018. - Т.13, №13. - С.16-28.
13. Локтев, А.А. Ударное взаимодействие твердого тела и упругой ортотропной пластинки / А.А. Локтев. - Текст : непосредственный // Механика композиционных материалов и конструкций. - 2005. - Т.11, № 4. - С. 478-492.
14. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. Перевод с английского М.И. Рейтмана; под редакцией Г.С. Шапиро. - Москва : Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука». - 1975. - 576 с. - Текст : непосредственный.
15. Привалов, С. В. Влияние жесткости подрельсового основания на взаимодействие экипажа и пути : специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог» диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Привалов Сергей Владимирович ; ФГУП ВНИИЖТ МПС России. - Москва, 2004. - 118 с. - Текст : непосредственный.

СИНТЕЗ ТЕПЛООБМЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА



Е.Н. Пирогов



Е.В. Драбкина

В статье рассмотрен термодинамический метод построения тепловых схем производств. Этот метод особенно актуален для теплопотребляющих производств, в которых в качестве теплоносителей используется острый пар. Показана технико-экономическая целесообразность вовлечения низкопотенциальных источников теплоты в реализацию технологических процессов.

Ключевые слова: тепловая схема, низкопотенциальная теплота, точка Пинча, теплообменный аппарат, острый пар, рекуперация теплоты

EDN: PLQXDJ

Промышленные производства, как правило, характеризуются значительным потреблением тепловой энергии. В зависимости от специфики технологических процессов, реализуемых на предприятиях, степень вовлеченности тепловой энергии в них различная. Отличительной особенностью использования тепловой энергии от других видов энергии является образование материальных потоков с пониженным температурным потенциалом (вторичные энергоресурсы), которые, как правило, сбрасываются в окружающую среду в инженерных сооружениях.

Высокая степень использования вторичных энергоресурсов характерна для энергоэффективных производств и особенно актуальна для таких отраслей как энергетика, транспорт, химическая, нефтеперерабатывающая и др.

При проектировании теплопотребляющих производств, а к ним относятся производства выпечечных отраслей, перед специалистами стоит следующая основная проблема: при наличии технологических регламентов производств требуется разработать аппаратное оформление этих процессов. Указанная проблема получила название задачи синтеза технологических схем производств.

Конечно, создание такого производства требует значительных энергетических затрат, и потому разработка оптимизированной теплотехнологической схемы приобретает важное значение, влияющее на себестоимость продукции.

При проектировании теплопотребляющих производств, а к ним относится производство кормового белка, перед специалистами стоит следующая основ-

Пирогов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплоэнергетика и водоснабжение на транспорте» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: теплотехника, теплотехника и водоподготовка. Автор 103 научных работ.

Драбкина Елена Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплоэнергетика и водоснабжение на транспорте» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: энергосбережение, теплотехника. Автор более 65 научных работ.

Коваленко Надежда Всеволодовна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры «Экономические теории» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). Область научных интересов: экономические проблемы развития, экономическая политика, экономический рост, инновационное развитие экономики, государственное регулирование экономики. Автор более 50 научных работ.

ная проблема: при наличии лабораторных регламентов технологических процессов получения необходимых продуктов требуется разработать аппаратное оформление этих процессов. Указанная проблема получила название задачи синтеза технологической схемы производства.

Учитывая важность данной проблемы, в технической литературе опубликовано значительное количество работ [1;2], посвященных различным аспектам ее решения, предложен ряд более или менее адекватных математических моделей, изучены возможные критерии оптимизации, разработаны способы достижения оптимальных значений этих критериев. При этом существенное внимание уделялось вопросам синтеза типичных подсистем, т.е. таких, которые встречаются в большинстве рассматриваемых производств.

Общеизвестно, что для теплотребляющих производств, к которым можно отнести нефтеперерабатывающие, химические, биотехнические и сходные с ними производства, характерным является неоднократное технологически обусловленное нагревание и охлаждение компонентов сырья и промежуточных продуктов. В связи с этим для таких производств весьма актуальной является задача синтеза тепловой подсистемы.

Методы исследования

Суть этой задачи заключается в том, чтобы обеспечить максимально эффективную рекуперацию теплоты путем передачи теплоты от более горячих материальных потоков к более холодным. Уже по ранним, очень осторожным оценкам фирмы «Еххон Со» [3], удачно сконструированная теплообменная сеть (ТС) может обеспечить до 30% экономии тепловой энергии. Разработанные в 80-е годы XX века методы синтеза оптимальных ТС оказались еще более эффективными. Опыт фирмы «Union Carbide Corp.» показал, что решения, полученные с их помощью, обеспечивают экономию около 50% энергии, а средний срок окупаемости составляет 6 месяцев [4]. В основе

указанных методов лежит термодинамический подход, разработанный в [5;6].

Результаты и обсуждение

В статье представлены результаты применения этого подхода при анализе и оптимизации ТС теплотребляющего производства.

Первым этапом применяемого метода является формирование исходных данных для решения задачи синтеза. К ним относятся перечень материальных потоков, требующих нагрева либо охлаждения. В дальнейшем эти потоки называются, соответственно, холодными и горячими, при этом может оказаться, что какой-либо холодный поток имеет более высокую температуру, чем какой-либо горячий). Далее даны характеристики этих потоков:

- начальная температура t_i^{HX} , $1 \leq i \leq m$ для холодных и t_j^{HF} , $1 \leq j \leq n$ для горячих потоков;
- конечная температура t_i^{KX} , $1 \leq i \leq m$ для холодных и t_j^{KF} , $1 \leq j \leq n$ для горячих потоков;
- массовый расход w_i^{X} , $1 \leq i \leq m$ для холодных и w_j^{F} , $1 \leq j \leq n$ для горячих потоков;
- теплоемкость c_i^{X} , $1 \leq i \leq m$ для холодных и c_j^{F} , $1 \leq j \leq n$ для горячих потоков, где m — число холодных; n — число горячих потоков.

В статье представлены результаты применения этого подхода при анализе и оптимизации тепловой схемы теплотребляющего производства, работа которого характеризуется наличием технологических потоков, требующих одновременного нагрева одних и охлаждения других.

Анализ технологического регламента позволил сформулировать исходные данные для проектирования тепловой схемы. Это пять технологических потоков, требующих охлаждения, далее горячие потоки, и четыре технологических потока, требующих подогрева, далее холодные потоки. Эти потоки характеризуются такими параметрами, как температура на входе и выходе в теплообменный аппарат и расход, которые приведены, соответственно, в табл. 1,2.

Таблица 1

Тепловые потоки – источники теплоты

Название потока	Обозначение на схеме (рис. 1)	$t_j^{\text{HF}} / t_j^{\text{KF}}$, °C	w_j^{F} , т/ч
Горячий материальный поток 1	1Г	77/33	147,8
Горячий материальный поток 2	2Г	60/33	14,5
Горячий материальный поток 3	3Г	100/100	3,28
Горячий материальный поток 4	4Г	63/63	7,5
Горячий материальный поток 5	5Г	100/33	3,28

Тепловая схема действующего производства приведена на рис. 1. Характерной особенностью этой тепловой схемы является большое количество внешних источников тепловой энергии как в системе нагрева, так и в системе охлаждения.

Вторым этапом метода является построение составных кривых теплосодержания системы потоков. Ввиду особой важности этого понятия остановимся на нем подробнее. Кривой теплосодержания потока называется кривая в осях $Q-T$, описывающая совместное изменение температуры и энтальпии потока в процессе нагрева либо охлаждения. При постоянной (не зависящей от температуры) теплоемкости эти кривые имеют вид отрезков прямых. Поскольку понятие энтальпии потока не определено и имеет смысл говорить лишь о приращении энтальпии, кривые теплосодержания можно произвольно сдвигать по горизонтали. Для удобства изложения принято считать, что все эти кривые начинаются (или кончаются) на оси T .

Кривые теплосодержания для системы тепловых потоков, выделенных на первом этапе метода, изображены на рис. 2,а. Для удобства дальнейшего изложения, каждую из кривых дополним вертикальными лучами, идущими из ее концов.

Составная кривая теплосодержания горячих потоков получается суммированием значений Q для всех горячих потоков при каждом фиксированном T . В простейших предположениях, сформулированных выше, эта кривая оказывается ломаной, вершины которой возникают при температуре, равной начальной или конечной температуре горячих потоков. Аналогично определяется составная кривая теплосодержания холодных потоков.

Взаимное расположение составных кривых определяется следующим образом: горячая составная кривая располагается над холодной составной кривой. Перемещая холодную составную кривую вдоль оси энтальпии необходимо установить такую разницу температур между ближайшими точками, при кото-

Таблица 2

Тепловые потоки – потребители теплоты

Название потока	Обозначение на схеме (рис. 1)	$t_i^{\text{HX}} / t_i^{\text{KX}}, ^\circ\text{C}$	$w_i^X, \text{т/ч}$
Холодный материальный поток 1	1X	20/50	120
Холодный материальный поток 2	2X	20/80	45
Холодный материальный поток 3	3X	35/80	147,8
Холодный материальный поток 4	4X	80/100	49,3

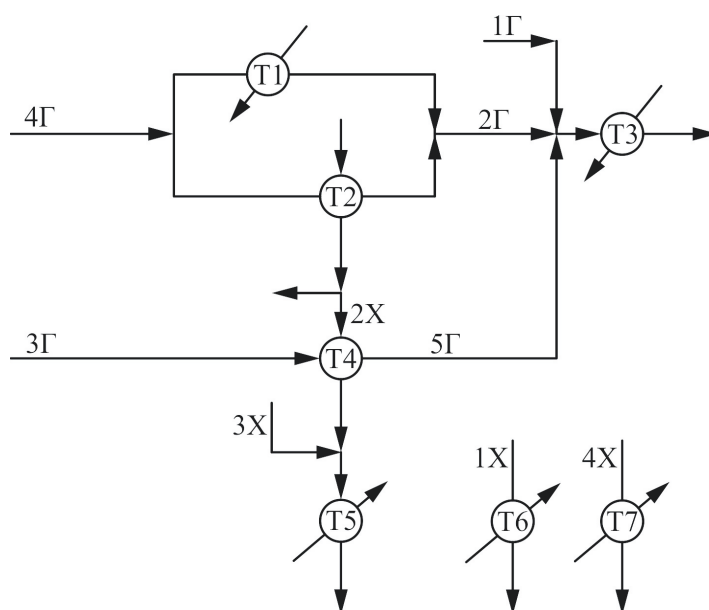


Рис. 1. Тепловая схема действующего производства

рой будет гарантирован теплообмен между ними. Минимальная разница температур называется точкой Пинча. Обязательным условием реализации этого метода является организации теплообмена только в области выше Пинча и отдельно в области ниже Пинча. Теплообмен между потоками через Пинч запрещен.

Анализ взаимного расположения составных кривых позволяет еще на стадии разработки определить капитальные затраты на изготовление теплообменных аппаратов для рекуперации теплоты $Q_{рек}$, а также затраты на охлаждение $Q_{охл}$ и нагревание $Q_{гр}$, позволяющие технически реализовать технологический процесс. Условие физической реализуемости процесса, вытекающее из второго закона термодинамики, заключается в том, что «горячая» кривая должна быть всюду выше «холодной» кривой. Условие технической реализуемости состоит в том, что в каждом вертикальном сечении «горячая» кривая отстоит от «холодной» не менее чем на δT .

Сформулированные условия позволяют наглядно представить самое «узкое место» синтезируемой ТС

(рис. 2,б). Эта точка на оси T , где впервые происходит соприкосновение сдвигаемой «холодной» кривой с неподвижной «горячей» кривой, называется точкой Пинча [5]. Положение составных кривых теплосодержания, при котором возникает Пинч, однозначно определяет минимальные необходимые затраты греющей и охлаждающей сред.

В том случае, когда необходимо обеспечить заданный минимально допустимый перепад температур δT , гарантирующий наличие движущей силы в каждом из теплообменных процессов, определение точки Пинча незначительно изменяется: необходимо сдвинуть вниз на δT составную кривую теплосодержания горячих потоков и рассматривать касание кривой теплосодержания холодных потоков с этой модифицированной кривой. На практике величины δT часто оказываются различными для разных типов теплообмена. В такой ситуации следует сначала сдвинуть вниз каждую из кривых теплосодержания горячих потоков на соответствующее δT , а затем определить модифицированную кривую теплосодержания горячих

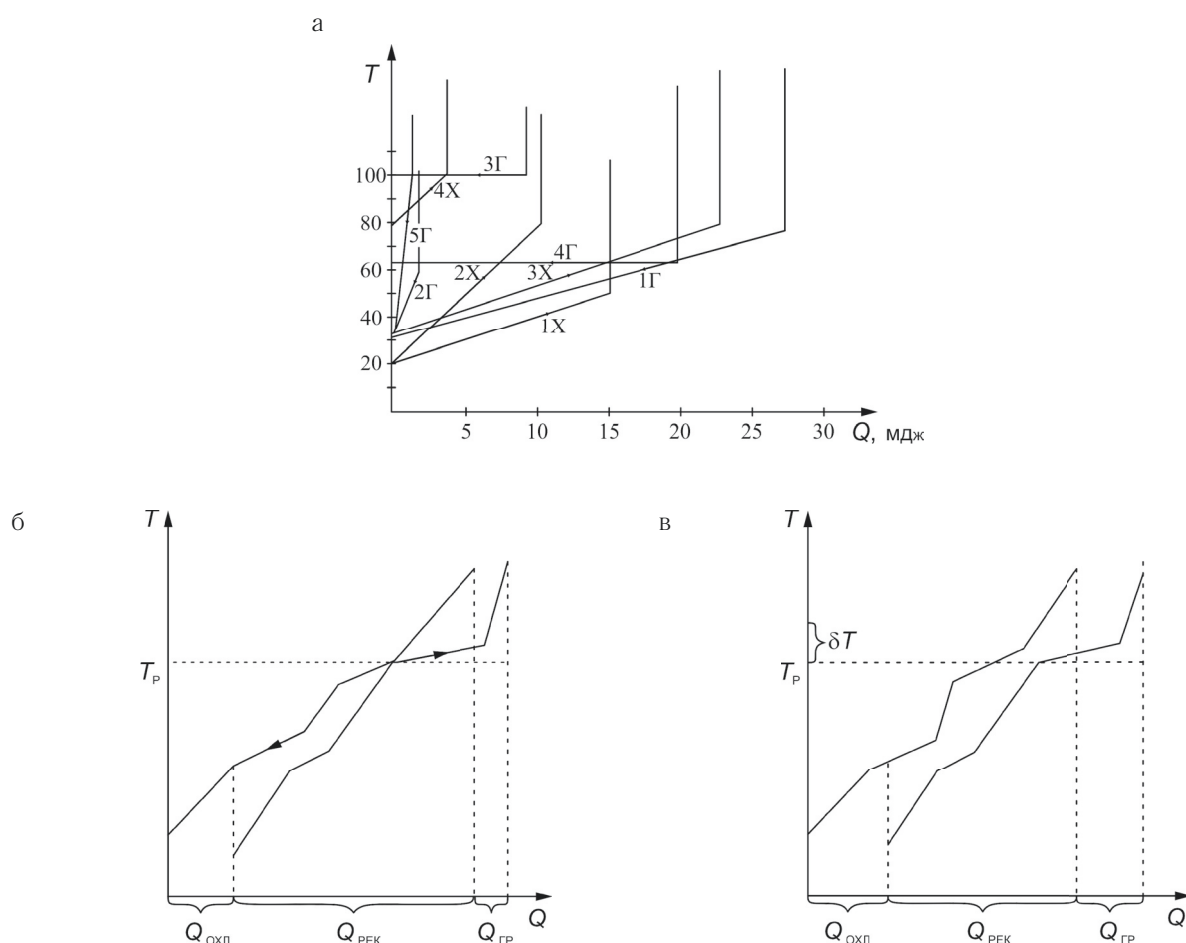


Рис. 2. Кривые теплосодержания для системы тепловых потоков производства

потоков как сумму (в указанном выше смысле) этих сдвинутых кривых.

В сформулированной выше задаче оптимизации ТС теплосодержащего производства было принято $\delta T = 8^\circ$ для теплообменов жидкость/жидкость и $\delta T = 4^\circ$ для теплообменов пар/жидкость (с конденсацией пара). Соответствующие модифицированные кривые теплосодержания горячих и холодных потоков приведены на рис. 2, в.

Видно, что точка Пинча системы потоков возникает при температуре $T_p = 59^\circ\text{C}$ (по холодным потокам). В основе термодинамического метода синтеза ТС лежат следующие фундаментальные свойства температуры Пинча, впервые сформулированные и доказанные в работе [6]:

- передача теплоты от потоков с температурой выше, чем T_p к потокам с температурой ниже, чем T_p (теплообмен через Пинч) энергетически невыгодна, так как приводит к увеличению затрат как греющей, так и охлаждающей среды (пара и холодной воды);
- отвод теплоты от потоков с температурой выше, чем T_p с помощью охлаждающей среды энергетически невыгоден, так как приводит к увеличению затрат греющей среды;
- нагрев потоков с температурой ниже, чем T_p с помощью греющей среды энергетически невыгоден, так как приводит к увеличению затрат охлаждающей среды.

Важнейшим следствием перечисленных свойств является возможность декомпозиции задачи синтеза ТС на две не связанные между собой подзадачи: задачу синтеза «горячей» подсистемы ТС, в которой участвуют потоки (или их подпотоки) с температурой выше T_p и используется только греющая среда, и задачу синтеза «холодной» подсистемы ТС, в которой

участвуют потоки (или их подпотоки) с температурой ниже T_p и используется только охлаждающая среда.

Из приведенных выше данных следует, что в ТС производства к «горячей» подсистеме относятся холодные потоки с температурой выше 59°C , горячие потоки жидкости с температурой выше 67°C и горячие потоки пара с температурой выше 63°C . Остальные потоки в этой ТС относятся к «холодной» подсистеме. Таким образом, для «горячей» подсистемы $n' = m' = 3$, для «холодной» — $n'' = 4$, $m'' = 3$. Характеристики соответствующих потоков приведены в табл. 3.

Потоки в верхней части таблицы соответствуют «горячей» подсистеме, в нижней — «холодной». Штрихи в индексе указывают, что соответствующий поток разбивается на два последовательных подпотока. Все характеристики подпотоков, не указанные в табл. 3, такие же, как и у соответствующих потоков в табл. 1, 2.

Третьим этапом термодинамического метода является синтез «горячей» и «холодной» подсистем ТС. В литературе изложено много различных способов осуществления этого этапа. При отсутствии развитого математического обеспечения наиболее перспективным представляется так называемый быстрый метод [7] в сочетании с процедурой устранения циклов [8]. В рассматриваемой нами задаче необходимость применения этой процедуры не возникала, так как данный метод привел в обоих случаях к ациклическим сетям.

Наконец, на четвертом этапе метода осуществляется слияние построенных на предыдущем этапе подсистем. Оптимизированная по теплосодержанию схема производства, полученная на этом этапе, изображена на рис. 3. Анализ состава теплообменного оборудования указывает на тот факт, что практически весь необходимый нагрев потоков производится лишь

Таблица 3

Тепловые потоки оптимизированной по теплосодержанию тепловой схемы

Горячие потоки		Холодные потоки	
Обозначение на схеме (рис. 2, а)	$t_j^{\text{нг}} / t_j^{\text{кг}}, ^\circ\text{C}$	Обозначение на схеме (рис. 2, а)	$t_i^{\text{нх}} / t_i^{\text{кх}}, ^\circ\text{C}$
1'Г	77/67	2'Х	59/80
3Г	100/100	3'Х	59/80
5'Г	100/67	4Х	80/100
1"Г	67/33	1Х	20/50
2Г	60/33	2"Х	20/59
4Г	63/63	3"Х	35/59
5"Г	67/33		

за счет рекуперации теплоты. При этом потоки 2X и 3X нагреваются до $77,5^{\circ}\text{C}$ вместо 80°C , что допускается регламентом. Поток же 4X нагревается до 96°C вместо 100°C , дальнейший его нагрев производится на финишной стадии. Следовательно, дополнительный нагрев потоков острым паром можно исключить.

В оптимизированной по теплотреблению тепловой схеме, как видно из рис. 3, использование внешних источников теплоты (острый пар) не предусматривается, так как весь необходимый нагрев материальных потоков производится за счет рекуперации теплоты.

Внедрение оптимизированной по теплотреблению тепловой схемы производства, представленной на рис. 3, позволяет обеспечить нагрев технологических потоков за счет внутри схемной рекуперации путем размещения теплообменных аппаратов общей площадью теплопередающей поверхности 220 м^2 . Кроме того, на 45% уменьшается потребление острого пара и в три раза снижается расход охлаждающей воды.

Заключение

Подводя итоги, следует подчеркнуть, что использование термодинамического метода анализа и построения тепловых схем производств является эффективным инструментом снижения энергоемкости продукции и перспективным направлением в энергосбережении, а его результативность достигается простым техническим решением — установкой теплообменников-рекуператоров.

Выводы

Термодинамический метод синтеза является мощным средством разработки ТС, гарантирующим получение значительной экономии тепловой энергии. Внедрение этого метода в практику проектирования и реконструкции теплотребляющих производств даст несомненно значительный экономический эффект. 

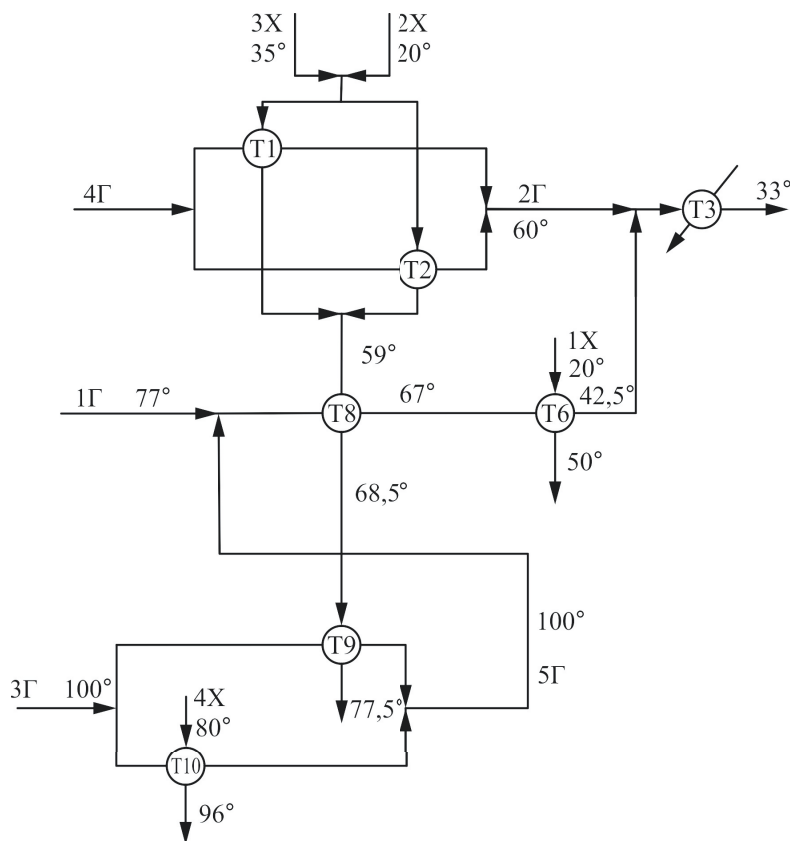


Рис. 3. Оптимизированная по теплотреблению тепловая схема производства

Литература

1. Основы проектирования химических производств : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» / С. И. Дворецкий [и др.]. - Москва : Спектр, 2014. - 355 с. - Текст : непосредственный.
2. Островский, Г. М. Оптимизация технических систем : учебно-методическое пособие / Г. М. Островский, Н. Н. Зиятдинов, Т. В. Лаптева ; Московский гос. ин-т стали и сплавов (технологический ун-т МИСиС), кафедра инженерной кибернетики. - Москва : КноРус, 2012. - 424 с. - Текст : непосредственный.
3. Whitcomb M.G., Orr P.M. //Hydrocarbon Proc. - 1973 - Vol. 52, № 7. - P. 65 - 66.
4. Linnhoff B., Vredeveld D.R. //Chem. Eng. Prog. -1984. - Vol. 80 , №7. - P. 33 - 40.
5. Linnhoff B., Flower J. R. /AIChE J. - 1978. - Vol. 24, № 4. - P. 633 - 654.
6. Linnhoff B., Hindmaren E. //Chem.Eng.Sci. -19. -Vol. 38 , №5. - P. 745 - 763.
7. Umeda T., Harada T., Shiroko K. // Comp. Chem. Eng. 1979. - Vol. 3, №1/4. - P. 273 - 282.
8. Linnhoff B., Turner J. A. //Chem. Eng. Sci. - 1981 . - Vol. 88 , №22. - P. 56 - 71.
9. Ponton J. W.Donaldson R. A. B. // Chem. Eng. Sci. -1974. - Vol. 29 , №12. - P. 2375 - 2377.
10. SuJ. -L., Motard R.L. // Comp. Chem.Eng. - 1984. - Vol. 8. - №2. - P. 67 - 80.

АДАПТАЦИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МЕСТНОЙ РАБОТЫ

В статье указывается на необходимость наличия в Центральном транспортном узле (ЦТУ) специализированной сортировочной станции для формирования местных грузовых поездов. Для определения потенциально выгодного местоположения подобной станции в узле предлагается использовать алгоритм Дейкстры.

Ключевые слова: центральный транспортный узел, алгоритм Дейкстры, размещение станции формирования местных поездов

EDN: NFZTPM



А.С. Шумский



Г.М. Биленко

В настоящее время принят курс по переориентации технологии работы ЦТУ на пассажирские перевозки, в том числе внутригородские (Московское центральное кольцо — МЦК), пригородно-городские по принципу «наземное метро» (Московские центральные диаметры — МЦД). При этом пригородное скоростное и высокоскоростное движение пассажирских поездов является одним из главных факторов, который предопределяет необходимость адаптации развития инфраструктуры узла в техническом и технологическом плане для обеспечения эффективности местной работы. Преобладающее

число маршрутов местных поездов проходит в зоне обращения МЦД.

В настоящее время в процессе переработки местного вагонопотока задействовано большое количество различных по своему характеру работы станций, в том числе сортировочных. Возникающие ограничения при организации местной работы напрямую связаны с реализацией на практике тенденции по пересмотру функций сортировочных станций ЦТУ. Наблюдается перепрофилирование их работы, частичное закрытие на них отдельных сортировочных систем или парков (Лосиноостровская, Люблино-Сортировочное, Перово

Шумский Алексей Сергеевич, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: вопросы повышения эффективности управления перевозками и безопасности движения, а также технологии работы, размещения и развития технических станций. Автор восьми научных работ.

Биленко Геннадий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление транспортными процессами» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: вопросы выбора способов усиления пропускной способности железнодорожных станций и участков, совершенствования технологии работы железнодорожных станций. Автор 55 научных работ.

Шмаль Сергей Николаевич, старший преподаватель кафедры «Железнодорожные станции и транспортные узлы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: теория и расчет параметров сортировочных устройств технических станций; топология и комбинаторика путевого развития железнодорожных станций и узлов. Автор 54 научных работ.

Шумский Сергей Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортными процессами» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: вопросы совершенствования технологии работы станций, обеспечения безопасности движения, развития и проектирования железнодорожной инфраструктуры. Автор 42 научных работ.

и т.д.). Это сводит к минимуму технологическое взаимодействие между сортировочными станциями и станциями на участках узла, ранее находившихся в зоне ответственности этих сортировочных станций. Поэтому данное обстоятельство следует учитывать при организации формирования и планировании маршрутов развоза местных поездов.

На взгляд авторов, проблемной может стать ситуация с перераспределением объемов местной работы между основными сортировочными и вспомогательными станциями узла без должного их развития. Как известно, основные станции Бекасово-Сортировочное, Орехово-Зуево и Рыбное уже загружены переработкой транзитного и местного вагонопотоков, перераспределенных со станций Люблино-Сортировочное, Лосиноостровская и Перово в связи с запуском МЦК и МЦД.

Помимо этого, нельзя не учитывать такой фактор, как санкции Запада против РФ. Сейчас наблюдается переключение движения грузопотоков с Европейских рынков на Северо-Западный и Восточный полигоны сети железных дорог [1], а также и на полигон ЦТУ. Это, естественно, повлечет за собой увеличение размеров переработки транзитного вагонопотока на основных сортировочных станциях ЦТУ. Поэтому, если параллельно произойдет дополнительное наращивание объемов, связанное с переработкой местного вагонопотока на сортировочных станциях при отсутствии резервов их путевого развития, то это негативно скажется на их работе и выполнении качественных показателей перевозочного процесса в целом.

Необходимо уделить внимание и другому фактору. Исследования АО «ИЭРТ» [2] показывают в перспективе до 2030 года рост размеров движения. По данным АО «ИЭРТ», в ЦТУ до 2030 года пассажирские перевозки увеличатся на 190 млн пассажиров, а грузовые перевозки — на 3,7 млн тонн. Более того, в перспективе не уменьшатся и объемы грузовой работы непосредственно по станциям, расположенным в границах Москвы и Московского региона в целом. В настоящее время только в Москву для обеспечения ее нужд (строительный комплекс, материально-техническое снабжение и т.п.) ежедневно ввозятся в среднем 2,5 тыс. вагонов в сутки. К 2025 году планируется, что столица будет получать 3,5 тыс. вагонов в сутки [1].

Постановка задачи

До настоящего времени известен ряд предложений [3;4] по совершенствованию инфраструктуры и технологии работы по переработке местных вагонопотоков в ЦТУ, в частности, в связи с вводом МЦК и МЦД.

В [3] предлагается концепция сохранения сортировочной работы по расформированию—формированию

местных грузовых поездов на исторических сортировочных станциях ЦТУ с оптимизацией их работы на основе концентрации переработки вагонов на одной из них. По мнению авторов, предпочтительнее всего производить концентрацию сортировочной работы по станции Люблино-Сортировочное, на которой будут формироваться сборно-вывозные поезда на все радиальные направления. Авторы показали преимущества предлагаемой концепции организации сортировочной работы по расформированию—формированию местных грузовых поездов.

В [4] дана оценка работы основных сортировочных станций в условиях формирования местных поездов при вводе МЦД. Рассмотрены вопросы распределения сортировочной работы с местными вагонами на основе технико-экономических расчетов между основными (Бекасово-Сортировочное, Орехово-Зуево, Люблино-Сортировочное, Перово, Лосиноостровская) и вспомогательными станциями узла (Александров-1, Куровская, Воскресенск). Даны варианты перераспределения назначений плана формирования местных поездов после ввода МЦД. По мнению авторов, для снижения повышенных загрузок путевого развития основных станций ввиду увеличения объемов переработки местных вагонов и дополнительной подборки групп вагонов для формируемых сборных поездов потребуется проведение реконструктивных мероприятий. Так, по станции Бекасово-Сортировочное необходимо увеличить дополнительно на шесть путей сортировочный парк и построить седьмой пучок с обустройством профилированной вытяжки к этому пучку. По станции Орехово-Зуево потребуется: восстановление шестого пучка в сортировочном парке; строительство нового транзитного парка на семь путей; вынос части сортировочной работы по формированию сборных поездов на станцию Александров-1 с одновременным ее развитием (строительство сортировочной горки малой мощности, парков приема и сортировочно-отправочного).

В целом нужно отметить, что проведенные исследования и высказанные предложения, безусловно, являются полезными, интересными и заслуживающими одобрения.

Однако, на взгляд авторов, наблюдаемые тенденции и реалии эксплуатации железных дорог, а также внешние вызовы, обуславливают актуальность дальнейшего рассмотрения вопросов, связанных с переработкой местных вагонопотоков в ЦТУ. Другими словами, требуется переосмысление и проведение комплекса технико-технологических мероприятий в части организации местной работы в ЦТУ, таких как: определение наиболее приемлемого варианта местоположения станции формирования местных поездов

в узле и установление потребной мощности путевого развития и технического оснащения с целью обеспечения устойчивого функционирования в краткосрочной и долгосрочной перспективе; выбор технологии на основе установления кратчайших маршрутов развоза формируемых местных поездов и определение категорий этих поездов (сборный, сборно-вывозной, сборно-участковый и т.д.).

Подход для улучшения организации работы ЦТУ с местными вагонопотоками

Альтернативный подход к организации эффективной технологии работы ЦТУ с местными вагонопотоками предусматривает наличие специализированной сортировочной станции формирования местных поездов с ее размещением на радиальных направлениях ЦТУ (одном или, при обосновании, на двух направлениях) [5]. Такой подход, на взгляд авторов, имеет ряд преимуществ технического, технологического и социального характера.

Преимущества технического и технологического характера

Наличие специализированной станции с предлагаемым вариантом ее расположения в ЦТУ даст возможность:

- по-иному посмотреть на организацию перевозочного процесса с местными вагонопотоками в ЦТУ. На специализированной станции будут сконцентрированы операции по расформированию прибывающих поездов с вагонами, следующими в адрес станций ЦТУ и формированию местных поездов (сборных, сборно-участковых, вывозных) для дальнейшего их развоза по станциям радиальных направлений узла. Возможна и переработка обратного местного вагонопотока со станций узла по завершении грузовых операций;
- разгрузить сетевые сортировочные станции Бекасово-Сортировочное, Рыбное и Орехово-Зуево от напряженной и продолжительной работы по формированию местных поездов, освободив при этом сортировочную горку и вытяжки формирования;
- устранить излишние пробеги вагонов (соответственно, и затраты на их перемещение), следующих первоначально в поездах на эти основные сортировочные станции для расформирования, а затем формирования местных поездов и последующего их развоза по станциям узла для выполнения с вагонами грузовых операций;
- исключить также существенные затраты (или, возможно, отдалить их по времени) по увеличению мощности путевого оснащения и технического развития как существующих основных сортировочных станций

при изменении размеров перерабатываемого транзитного и местного вагонопотоков, так и вспомогательных станций в случае переноса на них операций по формированию и отправлению местных поездов;

- окончательно подготовить станции Бекасово-Сортировочное, Рыбное и Орехово-Зуево на полноценное использование их производственного потенциала по переработке постоянно возрастающих объемов транзитных вагонопотоков.

Преимущества социального характера

Устройство подобных станций обеспечит создание рабочих мест в зоне тяготения к специализированным станциям и, тем самым, будет способствовать занятости местного населения.

По мнению авторов, такими станциями могут стать существующие станции (например, участковые, грузовые) при условии их реконструкции.

Определение потенциально возможного местоположения специализированной станции формирования местных поездов в ЦТУ

Одним из путей решения задачи по выбору приемлемого варианта местоположения специализированной станции формирования местных поездов в узле является использование алгоритма Дейкстры [6].

В качестве примера для описания действия алгоритма Дейкстры рассмотрим представленный на рис. 1 граф схемы развития железнодорожного узла с 10 вершинами (станциями). На этом графе необходимо указать, каким образом будут заданы вершины и ребра этого графа.



Рис. 1. Граф схемы развития железнодорожного узла с 10 вершинами (станциями)

Пусть каждая вершина графа представляет собой железнодорожную станцию, а каждое ребро — связь между двумя вершинами графа (станциями), т.е. железнодорожный путь, который имеет вес, соответствующий расстоянию между станциями.

Выполнение пошагово алгоритма Дейкстры для графа схемы развития железнодорожного узла будет выглядеть так:

1. Изначальный шаг алгоритма: устанавливается начальная вершина графа (начальная станция) и его расстояние как 0, а остальные вершины (станции) — как бесконечность.

$$\text{dist}[\text{start_station}] = 0$$

$$\text{dist}[\text{station}] = \infty, \text{station} \neq \text{start_station}$$

2. Просмотр соседствующих вершин графа: для каждой станции, смежной с текущей станцией, вычисляется новое расстояние пути от начальной станции (вершины графа) до вершины смежной с ней станции через ребро, их соединяющее.

$$\text{new_cost} = \text{dist}[\text{current_station}] + \text{weight}(\text{current_station}, \text{adjacent_station})$$

3. Обновление расстояния: если новое расстояние меньше текущего расстояния, то оно обновляется, и эта станция добавляется в очередь на новое рассмотрение.

$$\text{if } \text{new_cost} < \text{dist}[\text{adjacent_station}]:$$

$$\text{dist}[\text{adjacent_station}] = \text{new_cost}$$

$$\text{queue.push}(\text{adjacent_station})$$

4. Далее повторяются шаги 2–3 алгоритма для всех следующих смежных станций.

5. Затем повторяются шаги 1–4 для всех других станций графа, которые позволяют определить кратчайшее расстояние между двумя вершинами графа (станциями).

Время на пошаговое выполнение алгоритма Дейкстры для графа узла с небольшим числом вершин не столь значимо для решения задачи ввиду ее малой размерности. Для задач с большим числом вершин графа (станций) это время может определяться по формуле [7]:

$$T(n) = O(V \log V + E),$$

где V — количество вершин (станций) в рассматриваемом графе;

E — количество ребер (железнодорожных путей) между вершинами (станциями) в графе.

Основная часть времени выполнения алгоритма связана с поиском и обновлением расстояний путей, что занимает $O(\log V)$ времени на каждом шаге, а также просмотром расстояний всех железнодорожных путей, что занимает $O(E)$ времени.

Итак, для представленного графа схемы развития железнодорожного узла с помощью алгоритма

Дейкстры требуется установить из произвольно выбранных вершин графа вершину, которая потенциально могла бы взять на себя функции станции формирования местных поездов. В нашем случае выбраны для расчетов следующие вершины графа: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 и 10.

Алгоритм Дейкстры позволяет находить минимальные кратчайшие расстояния маршрутов развоза местных поездов соответственно от каждой из этих выбранных вершин графа до всех вершин графа схемы развития узла. Для запуска алгоритма Дейкстры нужно составить матрицу смежности графа и установить начальную вершину графа.

Матрица смежности в теории графов — это матрица, в которой записаны связи между вершинами графа [8]. Если граф содержит n вершин, то матрица смежности будет иметь размерность $n \times n$. Каждый элемент матрицы смежности $A[i, j]$ показывает наличие или отсутствие ребра между вершинами i и j . Если между вершинами есть ребро, то $A[i, j] = 1$, в противном случае $A[i, j] = 0$.

В нашем случае матрица смежности для графа схемы развития узла, представленного на рис. 1, будет выглядеть так:

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
2	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0
3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
5	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
6	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
7	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
8	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
9	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0

Если из вершины i в вершину j существует ребро, то в матрице смежности будет показана 1, в противном случае — 0.

При запуске алгоритма Дейкстры происходит перебор каждой выбранной вершины графа, которая поочередно принимается за станцию формирования местных поездов. Для каждой вершины графа будут сохраняться кратчайшие суммарные расстояния маршрутов развоза местных поездов до всех станций графа.

Шаг 1. Запускается алгоритм Дейкстры из вершины 1. Создается массив d с длиной, равной количеству вершин графа. Он заполняется бесконечностями, кроме d_1 , которое будет равно 0. Создается массив u , в котором будут находиться все вершины графа. Каждый раз будем выбирать из массива u вершину v , для которой значение d_v минимально:

$$d = \left[\begin{array}{c} \infty \\ \text{бесконечность} \end{array}, 0, \infty, \infty, \infty, \infty, \infty, \infty, \infty, \infty \right]$$

$$u = [u_1, u_2, \dots, u_{10}],$$

где u_i — вершины графа; d_i — минимальное расстояние от изначальной вершины графа (принимаемой за начальную станцию формирования) маршрута развоза местного поезда до ближайшей, смежной с ней, следующей вершины (станции) в рассматриваемом графе.

Шаг 2. Выбирается вершина u_1 , для которой значение d минимально. Она удалится из массива u . Далее просматриваются все смежные вершины, и обновляются значения d у смежных вершин, если новое значение d меньше текущего.

$$d = \left[\begin{array}{c} \infty \\ \text{бесконечность} \end{array}, 0, 1, 1, \infty, 1, \infty, 2, \infty, 1 \right]$$

$$u = [u_2, u_3, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}].$$

Шаг 3. Выбирается вершина u_4 , для которой значение d минимально. Она удалится из массива u . Далее просматриваются все смежные вершины графа, и обновляются значения d у смежных вершин графа, если новое значение d меньше текущего.

$$d = \left[\begin{array}{c} \infty \\ \text{бесконечность} \end{array}, 0, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 1 \right]$$

$$u = [u_2, u_3, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}].$$

Шаг 4. Выбирается вершина u_6 , для которой значение d минимально. Она удалится из массива u . Далее просматриваются все смежные вершины графа и обновляются значения d у смежных вершин, если новое значение d меньше текущего.

$$d = \left[\begin{array}{c} \infty \\ \text{бесконечность} \end{array}, 0, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 1 \right]$$

$$u = [u_2, u_3, u_5, u_7, u_8, u_9, u_{10}].$$

Шаг 5. Выбирается вершина u_8 , для которой значение d минимально. Она удалится из массива u . Далее просматриваются все смежные вершины, и обновляются значения d у смежных вершин, если новое значение d меньше текущего.

$$d = \left[\begin{array}{c} \infty \\ \text{бесконечность} \end{array}, 0, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 1 \right]$$

$$u = [u_2, u_3, u_5, u_7, u_9, u_{10}].$$

В результате расчетов с использованием алгоритма Дейкстры установлено, что минимальное значение d равно 1 для вершин графа u_2 , u_3 и u_{10} , и равно 2 для

вершин u_5 , u_6 и u_8 . В итоге наименьшие суммарные расстояния маршрутов развоза местных поездов дают вершины графа u_2 , u_3 и u_{10} . Поэтому для рассматриваемого графа схемы развития узла с 10 вершинами потенциально возможным местоположением специализированной станции формирования местных поездов может быть вариант ее размещения в одной из вершин графа 2, 3 или 10.

Составим граф схемы развития ЦТУ. С использованием существующей схемы развития ЦТУ (исходная информация о схеме развития узла представлена в [3]), составляется граф этого узла (рис. 2). При составлении графа схемы развития ЦТУ необходимо пронумеровать отдельные пункты, входящие в него.

На рис. 2 показан граф схемы развития ЦТУ с нумерацией отдельных пунктов с указанием на нем основных существующих маршрутов развоза местных поездов (маршруты развоза составлены с использованием данных [4]).

В порядке апробации действия алгоритма Дейкстры применим его к графу существующей схемы развития ЦТУ (рис. 2). Использование алгоритма Дейкстры и информационного ресурса [9] позволило выполнить перебор 25 вершин графа (выбранных в качестве станций формирования) и установить из них местоположение потенциальной вершины в графе схемы развития ЦТУ, на которую возможно возложить функции специализированной станции формирования местных поездов. Критерием выбора этой вершины графа узла, как было сказано выше, являются минимальные суммарные расстояния маршрутов развоза местных поездов от станций формирования до всех других станций. Выполненные расчеты показали, что такой вершиной (станцией формирования) может быть вершина графа, которая расположена в восточной части графа схемы развития ЦТУ на участке Куровская—Шатура, примерно рядом со станцией Шатура.

На рис. 3 представлен граф схемы развития ЦТУ с иллюстрацией перспективного варианта маршрутов развоза местных поездов от специализированной станции формирования, местоположение которой было выше установлено с помощью алгоритма Дейкстры.

Заключение

В целом предлагаемые в статье техническо-технологические решения по развитию железнодорожной инфраструктуры и технологии работы будут способствовать организации эффективной работы ЦТУ с местными вагонопотоками. Использование алгоритма Дейкстры вполне уместно при оценке вариантов технологии развоза местных поездов по станциям участков и направлениям других транспортных узлов.



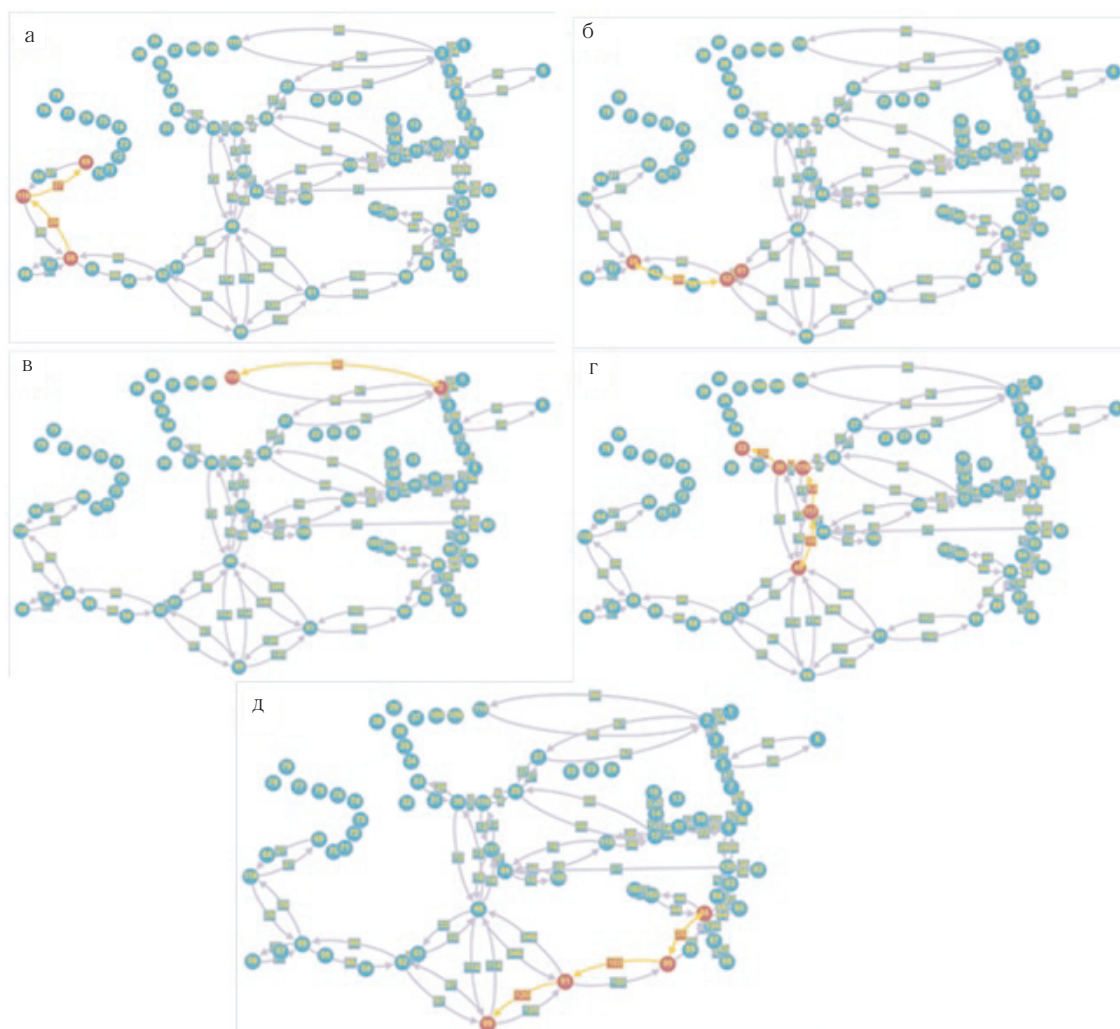


Рис. 2. Граф схемы развития ЦТУ с нумерацией отдельных пунктов и основными существующими маршрутами развития местных поездов от станций, участвующих в их формировании:

- а – маршрут развития местных поездов на участке Бекасово–Кунцево II; б – маршрут развития местных поездов на участке Бекасово–Подольск, Гривно; в – маршрут развития местных поездов на участке Александров–Дмитров; г – маршрут развития местных поездов с на участке Люблино–Сортировочное–Ховрино; д – маршрут развития местных поездов на участке Воскресенск–Ожерелье

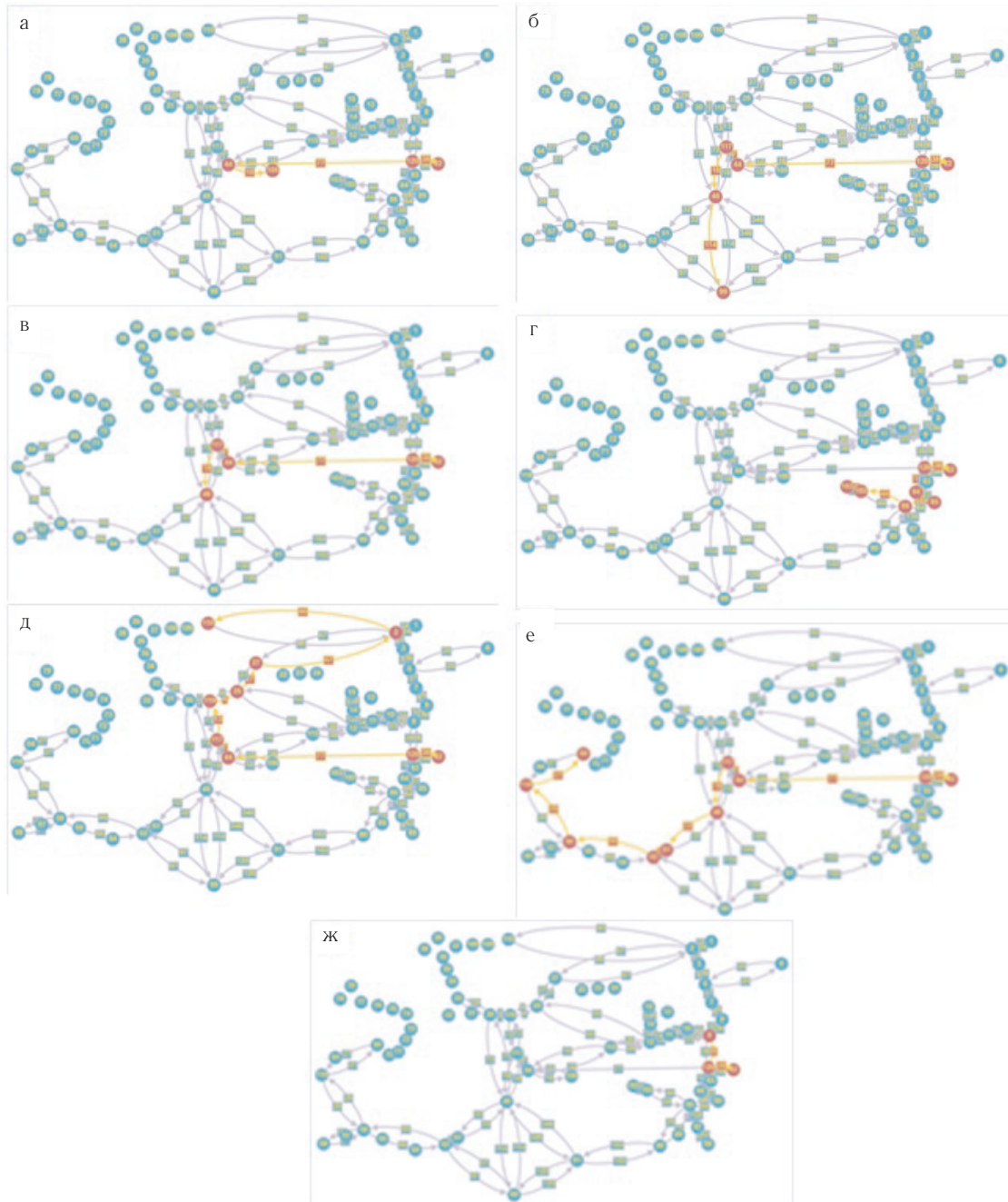


Рис. 3. Иллюстрация на графе схемы развития ЦТУ перспективного варианта маршрутов развоза местных поездов по участкам от специализированной станции формирования местных поездов, местоположение которой установлено с помощью алгоритма Дейкстры: а – на участке Шатура–Перово, Люберцы I; б – на участке Шатура–Ожерелье; в – на участке Шатура–Люблино; г – на участке Шатура–Быково; д – на участке Шатура–Дмитров; е – на участке Шатура–Кунцево II; ж – на участке Шатура–Куровская

Литература

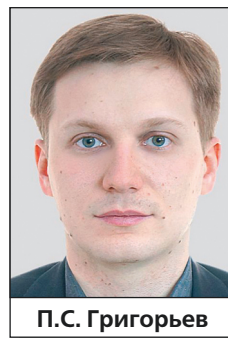
1. Гудок. ру. [сайт] / генеральный партнер ОАО «РЖД» . - Москва. Обновляется в течение суток . - URL : <https://www.gudok.ru> (дата обращения 03.06.2023). - Текст : электронный.
2. Институт экономики и развития транспорта. История, кадры, проекты. 1949 — 2020. Москва: Феория, 2020. - С.336-372. - Текст : непосредственный.
3. Бакин, А.А. Выбор технологии организации местной работы по формированию-расформированию местных грузовых поездов в Центральном транспортном узле в условиях интенсификации пригородно-городского движения / А.А. Бакин, А.В. Колин . - Текст : непосредственный // Федор Петрович Кочнев — выдающийся организатор транспортного образования и науки в России : труды международной научно-практической конференции / Отв. ред. А.Ф. Бородин, сост. Р.А. Ефимов. - Москва: РУТ(МИИТ), 2021. - С.52-60.
4. Организация местной работы в Московском железнодорожном узле в условиях организации диаметального движения пригородно-городских поездов/ Е. В. Бородина, Е. О. Дмитриев, Г. Г. Горбунов, Е.А. Алексевнин . - Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. - 2021. - № 21. - С. 33-44.
5. К вопросу организации переработки местных вагонопотоков в Центральном (Московском) транспортном узле с учетом современных тенденций его развития / С.П. Шумский , А.С. Шумский , С.Н. Шмаль, Н.О. Бересток . - Текст : непосредственный //Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. Межвузовский сборник научных трудов. Москва: РУТ(МИИТ): РОАТ, 2022. - С.32-40.
6. Кувайскова, Ю. Е. Алгоритмы дискретной математики : учебное пособие / Ю. Е. Кувайскова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет». - Ульяновск : УлГТУ, 2017. - 99 с . - Текст : непосредственный.
7. Матвеев, С. В. Алгоритмическая топология и классификация трехмерных многообразий / С. В. Матвеев. - Москва : МЦНМО, 2007. - 453 с. - Текст : непосредственный.
8. Тараканов, В. Е. Комбинаторные задачи и (0,1)-матрицы / В. Е. Тараканов. - Москва : Наука, 1985. - 191 с . - Текст : непосредственный.
9. GraphOnline : [сайт]. - URL: <https://www.graphonline.ru> (дата обращения: 03.06.2023). - Текст : электронный.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ОБОЛОЧКУ КОТЛА БЕЗРАМНОЙ ЦИСТЕРНЫ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ С ЖЕСТКИМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

Исследуется определение продольной силы, действующей на оболочку котла вагона-цистерны при столкновении с препятствием. В решении учтены закон сохранения энергии и потенциальная энергия, связанная с деформацией оболочки, применяется теория оболочек. Представлены графики изменения силы в зависимости от скорости столкновения. Исследовано изменение силы до и после момента насыщения энергоемкости устройства, с учетом энергии деформации оболочки.

Ключевые слова: железнодорожная цистерна, безрамная цистерна, жесткое препятствие, теория оболочек, закон сохранения энергии

EDN: IHNFNK



П.С. Григорьев



С.В. Беспалько

На сети железных дорог применяются конструкции вагонов-цистерн, где в качестве несущей конструкции используется непосредственно сам котел вагона-цистерны [3]. Данный тип подвижного состава имеет ряд преимуществ перед наиболее распространенным типом вагонов-цистерн с рамной конструкцией [13;16]. В процессе эксплуатации возникают различные режимы работы, например, аварийные [12]. К таким режимам работы можно отнести ситуацию столкновения вагона-цистерны с жестким препятствием (рис. 1) [5]. Во время столкновения возникают значительные силы, которые воздействуют на оболочку котла цистерны. Возможность оценки этих сил на ста-

дии проектирования играет решающую роль для разработки безопасных конструкций. В связи с тем, что в нормативной документации регламентирована процедура учета аварийных режимов работы вагона во время эксплуатации, при проектировании необходимо учитывать поведение конструкции в различных аварийных режимах, в том числе, указанном выше [7]. Цель данной работы заключается в развитии расчетных методов определения уровня продольной силы, действующей на оболочку котла безрамного вагона-цистерны при столкновении с жестким препятствием.

В качестве основы разработки расчетных зависимостей определения силы взаимодействия оболочки

Григорьев Павел Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, математическое моделирование, динамика и прочность подвижного состава. Автор 50 научных работ.

Беспалько Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: строительная механика вагонов, динамика вагона, вопросы безопасности перевозки опасных грузов. Автор 139 научных работ.

Коржин Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: технология ремонта ходовых частей нетягового подвижного состава железных дорог, повышение износостойкости и оптимизация профиля катания железнодорожных колес, динамика и прочность подвижного состава. Автор 19 научных работ.

Ибодуллоев Шерзод Рустамович, старший преподаватель кафедры «Механика и математическое моделирование» Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, моделирование технологических процессов, математическое моделирование, теоретическая механика. Автор 14 научных работ.

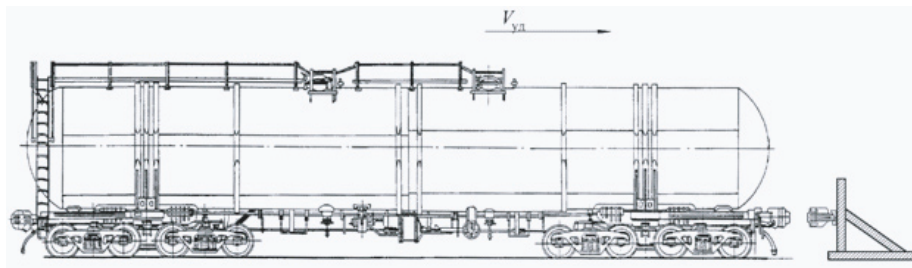


Рис. 1. Вариант маневрового соударения с жестким препятствием

котла и препятствия использован закон сохранения энергии. При этом потенциальная энергия деформации оболочки и работа сил в поглощающих устройствах должны соответствовать уровню кинетической энергии движущегося вагона в момент его контакта с препятствием.

Схема решения задачи

Составляются дифференциальные уравнения, описывающие упругие деформации оболочки. На основе этих уравнений определяются деформации и через них — накопленная потенциальная энергия. Задача решается в линейной постановке, при этом деформации пропорциональны внутренним силам, которые обусловлены взаимодействием конструкции с препятствием. Поскольку упругая энергия квадратично зависит от деформаций, можно сказать, что она квадратично зависит и от внутренних сил, действующих на оболочку. Сложность в формировании расчетных зависимостей связана с выражением деформаций оболочки через неизвестное воздействие. В статье предлагается вариант решения этой задачи.

На первом этапе выполняется расчет круговой цилиндрической оболочки с использованием уравнений теории оболочек любого вида [4;14;15]. При этом принимается, что на оболочку действует продольная сила, равная единице, распределенная по поверхности элементов, передающих нагрузку на цилиндрическую часть котла. От такой поверхностной нагрузки находятся деформации всех видов, учитываемых в исходных уравнениях теории оболочек. По этим деформациям подсчитывается упругая энергия, которая будет квадратичной функцией от неизвестного продольного усилия взаимодействия оболочки и жесткого препятствия. Умножив эту энергию на квадрат искомого продольного усилия, получаем значение потенциальной энергии, накопленной под действием этого усилия. Приравнивание этой энергии к кинетической энергии движения в момент сопротивления с препятствием за вычетом энергии, воспринимае-

мой поглощающим аппаратом, позволяет получить квадратное уравнение для определения силы соударения. Результат подсчета потенциальной энергии деформации от единичной силы будет представлять коэффициент при неизвестной продольной силы в разрешающем уравнении.

Материалы и методы

Рассмотрим порядок решения для случая применения дифференциального уравнения Доннелла [10]. Данное уравнение достаточно хорошо себя зарекомендовало при оценках несущей способности котлов вагонов-цистерн [8;9]. Обратим внимание, что это уравнение адаптировано для случая продольной нагрузки, что отражено в правой части этого уравнения

$$D\nabla^8 w + \frac{Eh}{R^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2} = -\frac{1}{R} \left(\mu \frac{\partial^3 f_x}{\partial x^2} - \frac{\partial^3 f_x}{\partial x \partial \beta^2} \right), \quad (1)$$

где x — координата вдоль образующей; y — координата по дуге сечения; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ — цилиндрическая

жесткость; μ — коэффициент Пуассона; h — толщина оболочки; E — модуль упругости; f_x — распределенная по поверхности нагрузка, направленная вдоль оси x .

Кроме того, приведем соотношение, связывающее продольное перемещение u и радиальное перемещение w

$$\nabla^4 u = \frac{1}{R} \left(\mu \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial \beta^2} \right). \quad (2)$$

Эти зависимости реализуют гипотезы, заложенные Доннеллом при сведении полной системы уравнений теории оболочек к одному уравнению относительного одного главного искомого параметра.

Дополнительно применим соотношения для деформаций изменения кривизны в направлении окружности χ_2 и линейных деформаций в продольном направлении ϵ_1 [6]

$$\chi_2 = -\frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \beta^2} + w \right), \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (4)$$

Основываясь на законе Гука, позволяющем разделить потенциальную энергию через деформацию и применив теорию оболочек, предложенную Доннеллом, запишем уравнение определения потенциальной энергии через деформации

$$\Pi = \int_0^{L_{\text{ци}}} \int_0^{2\pi} \left(\frac{D}{2} \chi_2^2 + \frac{Eh}{2} \varepsilon_1^2 \right) R dx d\beta. \quad (5)$$

В общем виде окончательное разрешающее уравнение задачи будет иметь вид

$$\Pi \cdot N^2 = T - \Theta - A_{\text{тр}}, \quad (6)$$

где Π – потенциальная энергия, полученная для единичной нагрузки; N – искомая продольная сила; $T = mv^2/2$ – кинетическая энергия; Θ – энергоемкость поглощающего аппарата; $A_{\text{тр}}$ – работа сил при перемещении жидкого груза.

Для определения работы $A_{\text{тр}}$ необходимо использовать уравнения гидродинамики. Например, действие жидкого груза на котел можно задавать через величины горизонтальных проекций суммарного давления жидкости на днище. Описание этих процессов в данной статье не рассматривалось ввиду их сложности.

Кроме того, для учета энергоемкости поглощающего аппарата Θ необходимо подставлять не энергоемкость (полную), а фактическую работу реакции аппарата при сжатии. Для этого рассмотрена силовая характеристика поглощающего аппарата ПМК-110А. Использование силовой характеристики позволило

получить аппроксимирующую функцию зависимости энергии, накопленной поглощающим аппаратом, от приложенного усилия:

$$\Theta(N) = A \cdot N^2 + B \cdot N, \quad (7)$$

где A, B – коэффициенты аппроксимации; для поглощающего аппарата ПМК-110А $A = 2,4 \cdot 10^{-8}$ м/Н, $B = 5 \cdot 10^{-3}$ м.

Основная трудоемкость решения задачи, связана с определением деформаций χ_2 и ε_1 , вычисляемых по формулам (3) и (4). При применении более точных уравнений теории оболочек [6;14;15] кроме χ_2 и ε_1 можно определить и перемещения v , а затем определить деформацию изменения кривизны образующей χ_1 , удлинения ε_2 в кольцевом направлении и сдвига γ . Запишем уравнения для определения вышеуказанных деформаций

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial v}{\partial \beta} + w \right); \chi_1 = \frac{\partial^2 w}{R^2 \partial x^2}; \gamma = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u}{\partial \beta} + R \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (8)$$

Необходимо иметь ввиду, что в этом случае жесткость на сдвиг будет определяться как $B = Gh$, где G – модуль сдвига. Как принято в приближенных теориях расчета оболочек [6], влияние этих деформаций на значение потенциальной энергии невелико, поэтому в настоящей работе эти деформации не учитываются.

Вернемся к уравнению Доннелла (1) и будем искать его решение применительно к традиционной расчетной схеме цилиндрической части котла цистерны. Эта схема хорошо известна и представлена в литературе [11]. Площадка нагружения продольной силой будет находиться вблизи одного концевое сечения оболочки, т.е. она будет выглядеть как на рис. 2.

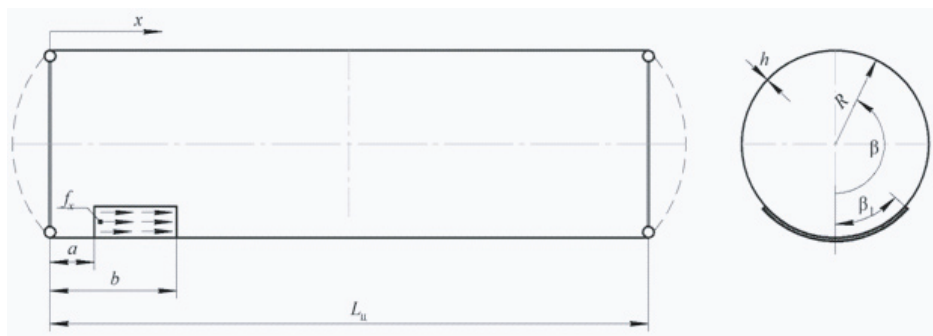


Рис. 2. Расчетная схема для определения внутренних усилий в оболочке: x – продольная координата; β – угловая координата; h – толщина оболочки; R – радиус срединной поверхности оболочки; $L_{\text{ци}}$ – длина цилиндрической части; f_x – распределенная по поверхности нагрузка; a, b, β_1 – координаты, определяющие границы опорного устройства

Решение уравнения (1) при выбранной расчетной схеме целесообразно выполнить в двойных тригонометрических рядах, отвечающих граничным условиям. Для этого аппроксимируем перемещения w , u и v следующим образом

$$\left. \begin{aligned} w(x, \beta) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} w_{mn} \sin(\lambda_m x) \cos(n\beta) \\ u(x, \beta) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} u_{mn} \cos(\lambda_m x) \cos(n\beta) \\ v(x, \beta) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} v_{mn} \sin(\lambda_m x) \sin(n\beta) \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где $\lambda_m = \frac{m\pi R}{L_u}$; n — номер члена ряда разложения по

окружности; m — номер члена ряда разложения по образующей.

Если подставить аппроксимацию w в исходное уравнение (1), то, согласно методу Бубнова-Галеркина [1; 2], оно будет сведено к бесконечной системе алгебраических уравнений относительно коэффициента w_{mn} . Оператор ∇^8 в этом случае представляется выражением $(\lambda^2 + (n/R)^2)^4$, а второе слагаемое уравнения (1) будет представлено коэффициентом λ^4 . Распределенную нагрузку f_x также представим двойным тригонометрическим рядом

$$f_x(x, \beta) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} f_{xmn} \cos(\lambda_m x) \sin(n\beta). \quad (10)$$

Тогда правая часть уравнения (1) будет иметь вид

$$-\frac{1}{R} \left(\mu \lambda_m^3 + \lambda \left(\frac{n}{R} \right)^3 \right).$$

Подставив выражения (9) и (10) в (1) и выполнив преобразования по методу Бубнова-Галеркина, получим выражение для определения коэффициента ряда w_{mn}

$$w_{mn} = \frac{-\frac{1}{R} \left(\mu \lambda_m^3 + \lambda \left(\frac{n}{R} \right)^2 \right) f_{xmn}}{D \left(\lambda^2 + \left(\frac{n}{R} \right)^2 \right)^4 + \frac{Eh}{R^2} \lambda_m^4}. \quad (11)$$

Используя уравнение (2), найдем выражение для определения u_{mn} через коэффициент w_{mn} . После подстановки аппроксимации в уравнение (2) и применения метода Бубнова-Галеркина приходим к выражению для коэффициента u_{mn}

$$u_{mn} = \frac{\left(-\mu \lambda_m^3 + \lambda \left(\frac{n}{R} \right)^2 \right) w_{mn}}{R \left(\lambda_m^2 + \left(\frac{n}{R} \right)^2 \right)^2}. \quad (12)$$

Выведем зависимости для определения коэффициентов рядов f_{xmn} . f_x — продольная распределенная по поверхности единичная нагрузка. Будем считать, что интеграл f_x по площадке S равен единичной силе N . S для рассматриваемой задачи будет определяться как $S = (b-a)R\beta_1$.

Согласно схеме подсчета коэффициентов рядов Фурье получаем выражение для подсчета f_{xmn}

$$f_{xmn} = \frac{4 f_x (\sin \lambda_m b - \sin \lambda_m a) \sin n\beta_1}{\lambda_{mn} n L_u \pi}. \quad (13)$$

Подставив выражение (13) в формулу (11) для подсчета w_{mn} , получим

$$w_{mn} = \frac{-\frac{1}{R} \left(\mu \lambda_m^3 + \lambda \left(\frac{n}{R} \right)^2 \right) f_{xmn}}{D \left(\lambda^2 + \left(\frac{n}{R} \right)^2 \right)^4 + \frac{Eh}{R^2} \lambda_m^4} \times \frac{4 f_x (\sin \lambda b - \sin \lambda a) \sin n\beta_1}{\lambda n L_u \pi}. \quad (14)$$

Аналогично может быть получено выражение для подсчета u_{mn} .

Зная эти перемещения, находим деформации χ_2 и ε_1 . При принятой аппроксимации выражения для коэффициентов рядов деформаций χ_2 и ε_1 имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \chi_2(x, \beta) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} \chi_{2mn} \sin(\lambda_m x) \cos(n\beta) \\ \varepsilon_1(x, \beta) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} \varepsilon_{1mn} \cos(\lambda_m x) \cos(n\beta) \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где $\chi_{2mn} = \frac{1}{R^2} (n^2 + 1) w_{mn}$ — выражение для коэффици-

циентов рядов деформации изменения кривизны в направлении окружности; $\varepsilon_{1mn} = \lambda_m u_{mn}$ — выражение для коэффициентов рядов деформации удлинения вдоль образующей.

Для подсчета потенциальной энергии требуется вычислить интегралы от квадрата ряда, представляющего деформации в пределах всей поверхности цилиндрической оболочки (5). При этом имеет место ортогональность тригонометрических функций. Запишем итоговое уравнение для подсчета потенциальной энергии после выполнения необходимых операций интегрирования

$$\Pi = \frac{L_u \pi}{2} R \left(\left(\frac{D}{2} \sum_n \sum_m \chi_{2mn}^2 + \frac{Eh}{2} \sum_n \sum_m \varepsilon_{1mn}^2 \right) \right). \quad (16)$$

Следует помнить, что коэффициенты ряда зависят от величины неизвестной продольной нагрузки N , которая, естественно, также войдет в эту сумму,

как N^2 . Таким образом, подставив уравнения (16) и (7) в уравнение (6), получим квадратное уравнение относительно искомой продольной силы соударения N . Приведем окончательный вид выражения для подсчета искомых усилий в оболочке

$$N = \frac{\sqrt{(4A(f_x S)^4 + 4\Pi(f_x S)^2)T + B^2(f_x S)^4 - B(f_x S)^2}}{2A(f_x S)^2 + 2\Pi}. \quad (17)$$

При решении квадратного алгебраического уравнения относительно силы N было получено два корня. Результат решения, имеющий отрицательное значение, ввиду отсутствия его физического смысла, не приводится.

Следует отметить, что выражение (17) позволяет определить усилия в оболочке только в пределах работы поглощающего аппарата. В случае, когда накопленная энергия поглощающего аппарата достигнет максимального значения $\mathcal{E}_{\max}$, выражение для подсчета усилий в оболочке будет определяться по формуле

$$N = (f_x S) \cdot \sqrt{\frac{T - \mathcal{E}_{\max}}{\Pi}}. \quad (18)$$

Таким образом, при моделировании столкновения вагона-цистерны с жестким препятствием в случае реализации полной энергоемкости поглощающего аппарата результирующая зависимость решения будет иметь перелом.

Результаты

Приведем результаты вычислений, полученных на основе выражений (17) и (18). При выполнении вычислений принималось, что в случае, когда поглощающий аппарат закрывается, и котел полностью заполнен жидким грузом, вся кинетическая энергия соударения трансформируется в потенциальную энергию деформации оболочки (рис. 3).

Рассмотрим вариант решения задачи со следующими исходными параметрами: $E=210$ ГПа; $\mu=0,28$; $L_{\text{ц}}=17$ м; $R=1,5$ м; $h=12$ мм; $a=1$ м; $b=2,5$ м; $\beta_1=36^\circ$. Котел принимался полностью заполненным, движение жидкого груза не учитывалось.

Большой интерес для практики представляют результаты вычисления подынтегральной части функции двух координат уравнения (5). Эти результаты лучше представить в виде трехмерных графиков, характери-

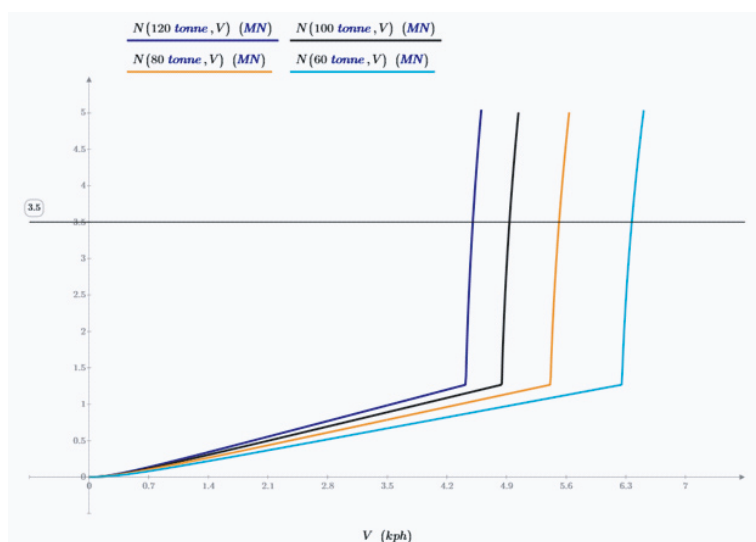


Рис. 3. Графики зависимости усилий, действующих на оболочку, от скорости соударения с жестким препятствием (синий график соответствует массе вагона 120 т, черный – 100 т, оранжевый – 80 т, голубой – 60 т)

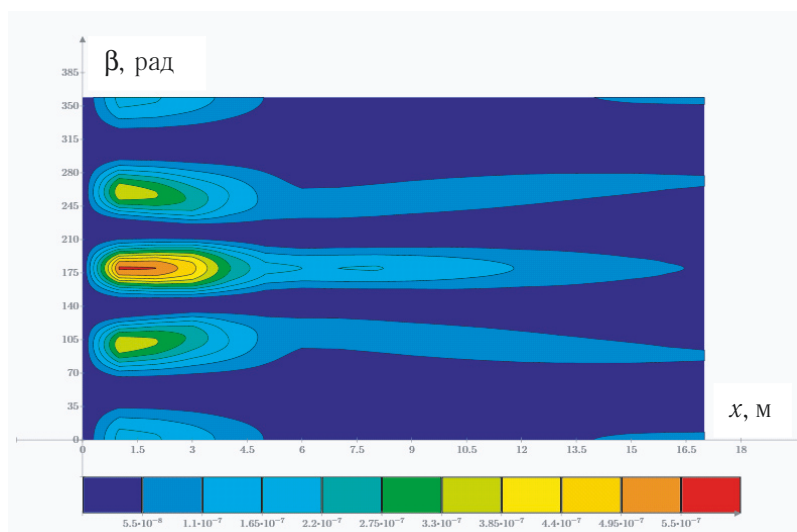


Рис. 4. Эпюра распределенной потенциальной энергии в цилиндрической части оболочки при столкновении вагона-цистерны с жестким препятствием

зующих плотность распределения потенциальной энергии по срединной поверхности оболочки (рис. 4). Под плотностью понимается величина накопленной потенциальной энергии от единичной силы в каждой точке поверхности.

На рис. 4 по оси абсцисс показана линейная координата x , по ординате — угловая координата β , цветом показан уровень распределенной потенциальной энергии, имеющий размерность Дж/м².

Выводы и обсуждение

Учет потенциальной энергии деформации оболочки показал, что ввиду большой жесткости оболочки в сравнении с поглощающим аппаратом, вклад от потенциальной энергии деформации оболочки в общую накопленную энергию достаточно мал. Однако в случае «закрытия» поглощающего аппарата в оболочке возникают большие усилия, способные вызвать пластические деформации. Требования современных нормативных документов [7] предусматривают допустимый уровень сжимающих нагрузок 3,5 МН. При варианте столкновения вагона-цистерны массой 120 т полная энергоемкость поглощающего аппарата реализуется на скорости 4,4 км/ч, а усилия при этом составляют 1,27 МН, а при скорости 4,5 км/ч уровень усилий достигает нормативных значений 3,5 МН. При скорости же 4,6 км/ч уровень сил начинает превышать 5 МН. Таким образом, можно утверждать, что при аварийном режиме работы, когда реализована полная энергоемкость поглощающего аппарата, уровень усилий, действующих на оболочку, будет превышать уровень, заложенный при проектировании.

Таким образом, предложена уточненная модель по определению усилий, действующих на оболочку котла безрамной цистерны при столкновении с жестким препятствием. Данный подход может применяться для определения напряженно-деформированного состояния котла безрамного вагона-цистерны при маневровых соударениях, в том числе, аварийных. Определение напряженного состояния необходимо как для оценки прочности, так и для оценки долговечности конструкции с позиции мало- и многоциклового усталости. 

Литература

1. Lopatin A. V., Morozov E. V. Approximate buckling analysis of the CCFF orthotropic plates subjected to in-plane loading, International Journal of Mechanical Sciences, 2015; 85: 38-44.

П.С. Григорьев, С.В. Беспалько, С.Н. Коржин, Ш.Р. Ибодуллоев
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ОБОЛОЧКУ КОТЛА
БЕЗРАМНОЙ ЦИСТЕРНЫ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ С ЖЕСТКИМ ПРЕПЯТСТВИЕМ»

2. Michael Ebie Onyia, Galerkin-Vlasov Variational Method for the Elastic Buckling Analysis of SSCF and SSSS Rectangular Plates / Michael EbieOnyia, Eghosa. O. Rowland-Lato, Charles Chinwuba Ike // International Journal of Engineering Research and Technology. ISSN 0974-3154, Volume 13, Number 6 (2020), pp. 1137–1146.
3. Авторское свидетельство № 1599254 А1 СССР, МПК В61D 5/00. Железнодорожная цистерна : № 4618234 : заявл. 20.10.1988 : опубликовано 15.10.1990 / А. П. Азовский, В. М. Бубнов, А. С. Вершинин [и др.] ; заявитель Московский институт инженеров железнодорожного транспорта . - EDN: KNZEOW.
4. Биргер, И. А. Прочность. Устойчивость. Колебания: справочник . В 3 томах / И.А. Биргер [и др.]; под общей редакцией И. А. Биргера и чл. - корр. АН Латвийской ССР Я .Н. Пановко. - Москва : Машиностроение. Т.3. - 1968 . - 285 с. Текст : непосредственный .
5. Богачев, В. И. Моделирование процесса развития внутреннего давления в котле цистерны и напряженного состояния днища при маневровом соударении : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Богачев Вячеслав Иванович . - Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) . - Москва , 2015. - 173 с. - EDN NFLQVA. - Текст : непосредственный.
6. Власов , В.З. Избранные труды / В.З. Власов .В 3 томах. Т. 1. Очерк научной деятельности. «Общая теория оболочек». Издание подготовлено Комиссией по изданию трудов В.З. Власова. - Москва . Издательство АН СССР, 1962. - 528 с . - Текст : непосредственный.
7. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам = Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 июня 2015 г. № 565-ст: введен впервые : дата введения 2016-07-01/ разработан Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ») . - Москва: Стандартинформ, 2014. - 54 с. - Текст : непосредственный.
8. Григорьев , П.С. Вариант представления разрешающего уравнения полубезмоментной теории оболочек в форме Доннелла для расчетов напряженного состояния и устойчивости котлов вагонов-цистерн / П.С. Григорьев, С.В. Беспалько, Н.С. Кодиров . - Текст : непосредственный // Материалы Второй Международной научно-технической конференции «Железнодорожный подвижной состав : проблемы, решения, перспективы». - Ташкент : ТГТрУ, 2023. - Текст : непосредственный.
9. Оценка вибрационных воздействий массивных деталей на цилиндрическую часть котлов вагонов-цистерн на основе теории оболочек / П.С. Григорьев, С.Н. Коржин, Ш.Р. Ибодуллоев, В.В. Гончаров. - Текст : непосредственный // Транспортное машиностроение. - 2023. - № 5(17). - С. 69-78. - DOI 10.30987/2782-5957-2023-5-69-78. - EDN KOLVNT.
10. Доннелл, Л. Г. Балки, пластины и оболочки / Л. Г. Доннелл; пер. с англ. Л. Г. Корнейчука. - Москва: Наука, 1982. - 568 с. - Текст : непосредственный.
11. Конструирование и расчет вагонов : учебник для студентов вузов ж.-д. транспорта / В.В. Лукин, Л.А. Шадр, В.Н. Котуранов [и др.]; под ред. В.В. Лукина. - Москва, 2000. - 726 с.
12. Определение поглощения энергии гасителем колебаний грузового вагона в аварийном режиме движения / Я.В. Болжеларский, Ю.Г. Соболевская, С.С. Довганюк, А.В. Батиг . - Текст : непосредственный // Наука та прогрес транспорту. - 2016. - № 4(64). - С. 15-23. - EDN: WWWSEV.
13. Полезный опыт создания большегрузных восьмиосных вагонов / В.Н. Котуранов, В.В. Козлов, П.С. Григорьев, М.П. Козлов . - Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. - 2022. - № 2 . - С. 42-45. - EDN: MLHWNF.
14. Тимошенко , С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек / С. П. Тимошенко ; избранные работы под редакцией Э. И. Григолюка. - Москва : Наука, 1971. - 807 с . - Текст : непосредственный.
15. Филин, А.П. Элементы теории оболочек: учебное пособие / А.П. Филин, проф., д-р техн. наук; Ленингр. ин-т инженеров ж.-д. транспорта им. акад. В.Н. Образцова. - Ленинград: Стройиздат. Ленинградское отделение, 1970. - 207 с. - Текст : непосредственный.
16. Большегрузные восьмиосные вагоны / д-р техн. наук , проф. Л. А. Шадр, канд. техн. наук Б. С. Евстафьев, канд. техн. наук , доц. В. В. Лукин [и др.]; под редакцией д-ра техн. наук , проф. Л. А. Шадура. - Москва : Транспорт, 1968. - 288 с. - Текст : непосредственный.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА



Д.Ю. Потапова



Н.А. Постоева

Цель представленного в статье исследования – рассмотрение методов определения местоположения транспортно-логистического объекта в определенном регионе. Проведенный анализ позволяет констатировать, что для решения данной проблемы требуется проверка отдельных вариантов по ряду факторов и учет индивидуальных характеристик региона.

Ключевые слова: политическое положение, экономическая отрасль, промышленность, транспортная инфраструктура

EDN: DKUGDD

Россия — крупнейшее в мире государство. Страна богата природными ресурсами, что помогает ей занимать лидирующее положение в различных экономических отраслях. Но на данный момент тяжело сказать, что экономика страны находится в наилучшем состоянии. Она терпит серьезные изменения из-за неопределенности в политической сфере, что приводит к нарушению функционирования всех остальных отраслей страны. Одна из отраслей, которая требует наибольших изменений для нормализации ее дальнейшей работы — промышленная. Но так сильно пострадал не сам процесс изготовления товаров, как процесс поставки компонентов для производства и доставка готового изделия покупателю. Также в Россию прекратился импорт некоторых готовых к использованию товаров, что также привело к отсутствию баланса в различных экономических сферах страны. Данная проблема является основной в настоящее время и требует большого внимания и наиболее быстрого раз-

вития плана дальнейших действий. Исходя из того, что импорт и экспорт потеряли свою силу, в стране следует развивать внутреннюю промышленность и способы ее транспортировки. В России должны быть внедрены новые промышленные предприятия, на которых будет производиться продукция, привозимая ранее из-за границы. А с развитием промышленной отрасли должна расширяться и транспортная. В стране должен быть модернизирован парк транспортных средств и сооружений. Но каждый регион требует индивидуальных изменений работы его системы.

Для того, чтобы более детально понять, как может быть изменена инфраструктура, следует проанализировать определенный регион. Рассматриваемый город должен обладать хорошо развитой транспортной инфраструктурой, включающей в себя несколько видов транспорта и аналогично развитой промышленностью. Одним из городов, удовлетворяющим этим требованиям является Нижний Новгород. Это

Потапова Дарья Юрьева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Организации перевозок на воздушном транспорте» Московского государственного технического университета гражданской авиации (МГТУ ГА). Область научных интересов: моделирование, логистика, прогнозирование. Автор 15 научных работ.

Постоева Наталья Александровна, студент кафедры «Технология транспортных процессов» Московского государственного технического университета гражданской авиации (МГТУ ГА). Область научных интересов: логистика, прогнозирование. Автор одной научной работы.

большой и развитый город миллионник, расположенный на месте слияния рек Оки и Волги. Он является водным центром с севера на юг и с запада на восток, находясь почти на середине Волги. Географическое положение Нижнего Новгорода позволяет ему связываться почти со всеми городами центральной России, следовательно иметь с ними торговые отношения. Также город находится в фазе активного развития. В Нижнем Новгороде, помимо строительства жилых комплексов и торговых центров, расширяются большинство транспортных объектов и их составляющие. Промышленность в городе также находится в постоянном развитии, что создает более устойчивую экономику региона и позволяет городу держать лидирующие положения по некоторым ее отраслям. Предприятия города в основном специализируются на машиностроительной, судостроительной, металлургической и авиационной промышленности (рис. 1). Нижний Новгород является признанным центром производства отечественных автомобилей и обеспечивает Российскую Федерацию автобусами. Также из города идут поставки уже обработанной древесины и целлюлозно-бумажных изделий, производство которых происходит как в самом городе, так и в Нижегородской области. Песочная промышленность тоже преуспевает и поставки из Нижнего Новгорода идут в 86 субъектов России. А ведь песок играет важную роль в изготовлении строительных материалов, которые производят в центральной части страны. Помимо основных производств, в поставках из города участвуют текстильная, химическая и металлургическая промышленности. Несмотря на то, что из Нижнего Новгорода идет много поставок на обработку или продажу, большое количество производственных материалов поступают в город.

В Нижегородской области есть достаточно большое количество деревообрабатывающих производств, но прежде, чем обрабатывать дерево, его следует добыть и привезти на предприятие. Поставки большого количества сырьевой древесины идут из Архангельска, который находится на большом расстоянии. В Нижнем Новгороде при производстве автомобильных, авиационных, водоходных средств и запчастей для них используется металл. Добычи этого ресурса в области не такие масштабные, а следовательно его нужно привезти из ближайших месторождений, таких как: Череповецкий металлургический комбинат, который находится в Вологодской области и с Кольского полуострова (Мурманская область). Еще в город идут поставки для химической промышленности, например, этилена. Одно из крупнейших предприятий, доставляющих такой компонент находится в Краснодаре и производит поставки в большие города, включая Нижний Новгород [1]. Все перевозки из Нижнего Новгорода по стране производятся различными видами транспорта, основным из которых является железная дорога. Данный вид транспорта хорошо развит в городе, а сам город в лице Московского железнодорожного вокзала является связующим транспортным звеном Горьковской железной дороги, по которой и производится основная часть всех перевозок. Вокзал является транспортным узлом, который, помимо железнодорожного транспорта, включает еще и автомобильный. Грузы также перевозят на авиационном транспорте и в этом городе помогает международный аэропорт «Стригино», который также является транспортным узлом, объединяющим в себе авиационный, железнодорожный и автомобильный транспорт [2]. Автомобильный транспорт также играет важную роль в перевозках по городу и

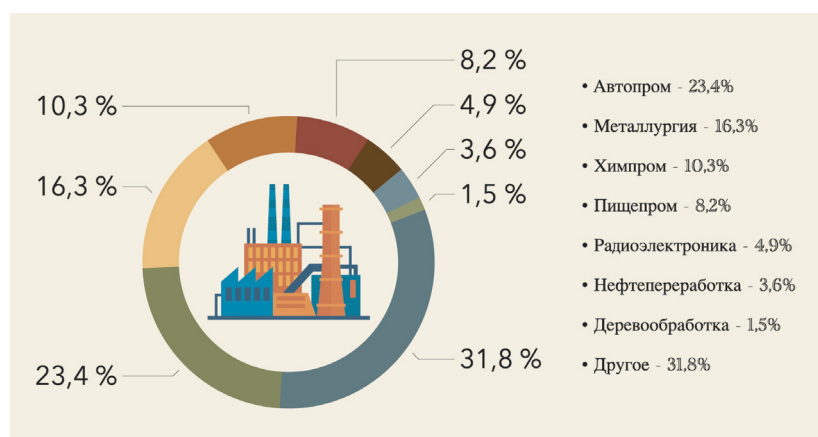


Рис. 1. Промышленность Нижнего Новгорода

за его пределы. Через Нижний Новгород проходят несколько основных автомагистралей федерального и регионального значения.

В настоящее время промышленная и транспортная отрасли в городе имеют слаженное и четкое взаимодействие. Но вследствие санкций, импорт в Россию большинства транспортных средств прекратился, и в стране начинается возрождение отечественного производства. В Нижнем Новгороде находятся несколько предприятий, специализирующихся на изготовление транспортных средств и запчастей. Данные производственные объекты будут расширены и выведены на новый уровень. Следовательно, грузооборот в городе существенно увеличится, что будет требовать расширения транспортной инфраструктуры. Московский вокзал будет расширен, а в город внедрится высокоскоростная магистраль [2]. Автомобильный транспорт также будет модернизирован. В регионе будет построено несколько объездных автодорог для разгрузки центра города и увеличения пропускной способности. Но в масштабе расширения промышленности этого будет мало. Следовательно, в город следует внедрить внутренний водный транспорт. Данный вид транспорта ранее присутствовал и был олицетворен грузовым речным портом, который находился на месте слияния рек. Речной порт отлично исполнял свои обязанности до 2014 г. Он являлся основным звеном всего пути по реке Волга и имел грузооборот в 5 миллионов тонн. Но в 2016 г. порт был ликвидирован и на его месте был построен стадион к чемпионату мира по футболу. Грузовой порт планировали перенести и построить вне города, но с 2019 года эта тема прервалась и не поднималась по сей день.

Если водный транспорт снова появится, он поможет облегчить все логистические процессы. Также это решит несколько основных проблем региона. Речной транспорт сможет разгрузить все остальные его виды, а в первую очередь — железнодорожный. При снижении трафика снизится и износ транспортных средств, что пойдет на пользу экономическим показателям региона. Также это сделает город еще более разносторонним и исключит неудобства при дальнейшем развитии транспортной инфраструктуры. Но как следует грамотно внедрять новый вид транспорта в уже функционирующую систему города?

Для того, чтобы модернизировать транспортную систему города, следует учесть несколько основных факторов: вид транспорта, местоположение, предполагаемый грузооборот, виды грузов и их габариты. В Нижний Новгород, как уже известно, следует внедрить внутренний водный транспорт. Виды и габариты также известны из промышленных предприятий города. Значит, главный вопрос на данный момент

— это местоположение будущего речного грузового порта. Для определения местоположения объектов транспортно-логистической инфраструктуры нет четкого метода. Но существуют математические модели и методы, которые помогут максимально эффективно решить данный вопрос. Одним из простых методов является эвристический метод Ардалана. Суть этого метода заключается в выявлении нескольких наиболее выгодных вариантов из большого списка путем последовательного перебора. Данный метод имеет свои преимущества, но основным недостатком является то, что при изменении центральной точки меняется вся структура, которая ведет к бесконечному решению частных задач. Следующий метод для определения наиболее эффективного варианта — это модель Артура Геоффриона. Суть модели заключается в том, что все варианты просчитываются по геометрическим формулам логистических затрат. Для расчетов по данной формуле должна быть известна площадь региона, плотность распределения объектов, величина складских и транспортных затрат. Для каждого местоположения рассчитывается индивидуальная формула, и по ней проверяется оптимальность каждого варианта и их количество. Метод Ардалана и модель Артура Геоффриона не являются наиболее выгодными для определения местоположения порта из-за необходимости большого количества изначальных данных, которых нет. В задаче насчитывается 3–6 вариантов, которые являются городами Нижегородской области. Порт должен находиться вне города, но в непосредственной близости к нему, так как в городе он располагаться не может из-за высокого трафика. Также существуют несколько сложных методов, которые строятся на основе сетевого и имитационного моделирования. Каждый из предложенных методов и подходов учитывает факторы, которые не дают наблюдать картину в целом и упускают важные аспекты. Следовательно, рассматривать один из них будет нецелесообразно. Поэтому требуется применить методологический подход к решению поставленной задачи и выделить те факторы, которые требуется учесть именно в частном случае. Методологический подход обычно включает в себя несколько этапов.

Первый этап подразумевает выбор из большого объема данных нескольких вариантов, отталкиваясь от определенных условий. В случае поставленной задачи — это определение точных городов Нижегородской области, которые претендуют на местоположение будущего порта. Основные требования, выдвигаемые городам: доступ к водным путям и приближенность к Нижнему Новгороду. Данным условиям соответствуют три небольших города: Балахна, Дзержинск и Кстово [3].

Вторым этапом является рассмотрение городов по отдельности и вычисление наиболее выгодного с точки зрения логистики. Каждый вариант будет рассмотрен по следующим пунктам: промышленность и ее направление; виды транспорта внутри и вне города: водный путь, с которым связан город [3]; его значимость на территории Российской Федерации (рис. 2). Город Дзержинск расположен восточнее Нижнего Новгорода и минимально от него удален. В нем будет рассмотрена прибрежная зона реки Ока. Транспортная инфраструктура города хорошо развита и включает в себя железнодорожный и автомобильный транспорт. В Дзержинске находится железнодорожный вокзал, а сам рельсовый путь растягивается на весь город и имеет несколько станций. Также через город проходит автомагистраль М7, которая связывает его с Нижним Новгородом и Москвой. Однако автомагистраль расположена с обратной стороны Дзержинска, что создает неудобства для автомобильного транспорта и принуждает производить перевозки через город, что в свою очередь усложнит трафик города. Промышленность в Дзержинске есть, но ее развитие находится на невысоком уровне. Город занимается химической промышленностью и производит только винипластовую пленку и взрывчатые вещества. Город Кстово также, как и Дзержинск минимально удален от столицы Приволжского федерального округа и расположен южнее. Город стоит на берегу реки Волга, что дает ему значимое пре-

имущество, ведь река является основным путем для перевозки грузов. В Кстово есть небольшой железнодорожный вокзал и несколько станций, расположенных в разных частях города. Также через Кстово проходит федеральная трасса М7, окружающая его с разных сторон. Промышленность в городе также специализируется на нефтехимических продуктах. Последний город — Балахна. В список преимуществ города входит то, что он находится севернее Нижнего Новгорода, а следовательно ближе к большинству городов, в которые производят поставки. Также в городе имеется автодорога регионального значения Р152, проходящая вблизи береговой линии. Имеются несколько железнодорожных станций, расположенных на всей территории города. Промышленность в городе более развита, чем в двух предыдущих и она специализируется на добыче древесины в небольших объемах, изготовлении целлюлозно-бумажных изделий и выпуск автобусов и спецавтомобилей. Сопоставляя три объекта, их преимущества и недостатки становится понятно, что городом, максимальной выгодным, для расположения в нем речного грузового порта, является Балахна.

Третий этап для определения местоположения речного грузового порта — выявление его точного местоположения на территории города. Вариантов в этом случае не так много, ведь площадь занимаемая Балахной не так велика, а главным условием является расположение порта на береговой линии. Также к

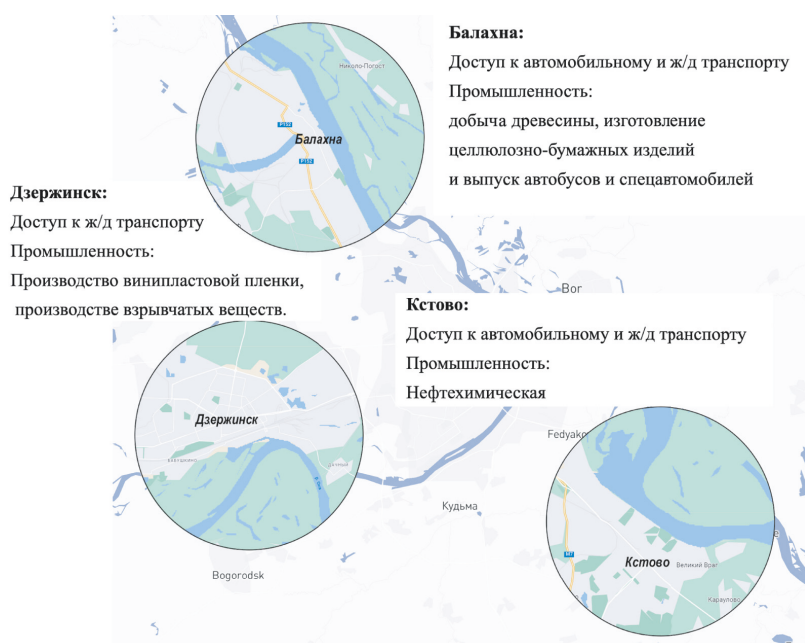


Рис. 2.

местоположению порта должен быть доступ всех видов транспорта, присутствующих в городе [3]. Производя анализ всей прибрежной зоны, можно сделать вывод, что наиболее выгодным местом является территория вблизи целлюлозно-бумажного комбината. Преимуществами такого местоположения — наличие прямого доступа к железнодорожному транспорту, простота подведения автомобильных путей, большая территория, которая в дальнейшем позволит расширить транспортное сооружение, а также удаленность будущего порта от жилых объектов.

Положение, в котором оказалась Российская Федерация, является неопределенным. По этой причине показатели в различных сферах страны характеризуются как низкоэффективные. Это означает, что экономика и взаимосвязанные с ней отрасли должны претерпеть изменения. Одной из важнейших сфер, которая требует модернизации, является транспортная. Данная сфера должна быть рассмотрена и улучшена поэтапно с учетом особенностей каждого региона страны. Но для развития отдельных регионов стоит учитывать, какая часть транспортной инфраструктуры требует наибольшего внимания и какими методами ее можно усовершенствовать.

В настоящей работе рассмотрен метод внедрения внутреннего водного транспорта в город Нижний Новгород. Данный транспорт отсутствует в городе и при предложении о его введении стоит учитывать множество факторов и индивидуальных характеристик города. Производится анализ для определения местоположения будущего транспортно-логистического объекта на примере трех четких географических позиций Нижегородской области. Каждый город подвергается исследованию с учетом предложенных требований, и выявляется наиболее успешный вариант. На следующем этапе рассматривается несколько мест для будущего речного порта внутри города и по преимуществам каждого выявляется наилучшее место. Следовательно, в работе рассмотрено определение точного местоположения транспортно-логистического объекта в масштабах страны с учетом индивидуальных факторов работы системы региона. 

Литература

1. Основные отрасли экономики региона. Инвестиционный портал Нижегородской области : официальный сайт . - URL : <https://www.nn-invest.ru/ru/region/major-industries> (дата обращения: 16.03.2023). - Текст : электронный.
2. Развитие инфраструктуры города. Официальный сайт застройки Нижнего Новгорода : сайт . - URL: <https://www.domostroynn.ru> (дата обращения 04.12.2023). - Текст : электронный.
3. Коровкин, В. С. Водные пути и порты. Устройство и компоновка порта : учебное пособие / В. С. Коровкин ; М-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. - Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2014. - 55 с. - Текст : непосредственный.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА СИСТЕМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РАБОТУ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

В статье проводится анализ части параметров, описывающих тепловое состояние стрелочных переводов, на примере решения двух задач, имеющих прикладную направленность: разморозка стрелочного перевода, укрытого снегом и поддержание прогретого состояния в условиях интенсивного снегопада. В результате проведенной серии расчетов установлены влияющие параметры задач, предложены методы консервативной оценки, разработаны практические приемы упрощения вычислительной части задач, предложены методики расчета каждой из задач, которые в дальнейшем могут быть дополнены при развитии тематики.



В.В. Королев

Ключевые слова: стрелочный перевод, теплораспределение, инженерное снеговедение, снег, обогрев

EDN: GKWOYC

Тенденции развития перевозок железнодорожным транспортом России в настоящее время характеризуются значительным возрастанием потока грузов в восточном направлении. В связи с этим запланированы и проводятся большие работы по увеличению провозной способности БАМа и Транссиба. В первую очередь это относится к инфраструктуре линий и ее основе — путевому хозяйству.

Важное значение для организации перевозочного процесса имеет состояние стрелочного хозяйства горловин станций, которое влияет на их пропускную способность и участков линии в целом. В климатических условиях БАМа и Транссиба необходимо уделять внимание стабильности и надежности работы стрелочного хозяйства в условиях низких температур [1;2].

Для обеспечения работы стрелочных переводов в условиях низких температур и выпадения большого количества осадков в виде снега, используются различные способы. Наиболее распространены системы

пневмообдувки и электрообогрева. Как правило, системы электрообогрева конструируются на основании опыта разработки аналогичных устройств [3–5]. В итоге результат действия таких систем не всегда положительный. Необходимы методики расчета, которые позволяют получить данные для проектирования систем электрообогрева с учетом особенностей тепловыделения и теплопереноса в системе «нагреватели — элементы стрелочного перевода».

Определение распределения тепла внутри элементов стрелочного перевода и снежного покрова, а также процессов таяния снега является задачей теории теплопроводности.

Согласно закону Фурье (1), плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$\vec{q} = \lambda \cdot \nabla T, \quad (1)$$

Королев Вадим Вадимович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: железнодорожный транспорт, стрелочные переводы, теплораспределение, верхнее строение пути. Автор 128 научных работ, в том числе трех учебных пособий. Имеет шесть патентов РФ.

где $\vec{q}$ — вектор плотности теплового потока; λ — коэффициент теплопроводности; T — температура.

В соответствии с первым началом термодинамики, имеем:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = \ddot{q}, \quad (2)$$

где ρ — плотность; c — удельная теплоемкость; T — температура; t — время; $\vec{q}$ — вектор теплового потока; $\ddot{q}$ — мощность теплового потока на единицу объема.

Подставив выражение (1) в (2) получим дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \ddot{q}. \quad (3)$$

Уравнение (3) определяет связь между пространственными и временными изменениями температуры. Для решения этого уравнения необходимо знать распределение температуры внутри рассматриваемого тела в начальный момент времени, форму тела и граничные условия.

Начальное условие определяется как:

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z). \quad (4)$$

Для решения задачи распространения тепла внутри стрелочного перевода и снежного покрова необходимо решить совместно четыре типа уравнений:

1. Распределение температуры поверхности тела в любой момент времени:

$$T_n(t) = f(t), \quad (5)$$

где $T_n(t)$ — температура поверхности тела в момент времени t .

2. Плотность теплового потока:

$$q_n(t) = f(t), \quad (6)$$

где $q_n(t)$ — тепловой поток в момент времени t .

3. Закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой:

$$q_n = h_f (T_s - T_b), \quad (7)$$

где h_f — коэффициент теплоотдачи конвекцией; T_s — температура поверхности; T_b — температура окружающей среды.

4. Закон Стефана-Больцмана для лучистого потока тепла между двумя поверхностями:

$$q_n(t) = \sigma^* (T_s^4 - T_a^4), \quad (8)$$

где σ^* — приведенный коэффициент лучеиспускания; T_a — абсолютная температура тепловоспринимающей поверхности.

Существует ряд способов для решения уравнений такого типа.

В настоящее время широкое распространение получил метод конечных элементов, который позволяет находить численное решение для сложных форм тел [6; 7]. В настоящей работе применялся расчетный код ANSYS (ANSYS Inc.).

Для решения уравнений (1)–(7) в конечно-элементном виде перепишем их в форме, соответствующей возможности применения программного пакета ANSYS.

Первое начало термодинамики в дифференциальной форме для тел заданного объема формулируется в виде:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \nabla T \right) + \nabla \cdot \{q\} = \ddot{q}, \quad (9)$$

где $\{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix}$ — вектор скорости массового переноса

тепла; $\{q\}$ — вектор теплового потока.

Для связи вектора теплового потока с тепловыми градиентами используем закон Фурье:

$$\{q\} = -[D] \nabla T, \quad (10)$$

где $[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix}$ — матрица теплопровод-

ности; K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} — теплопроводности элемента в направлениях X , Y и Z соответственно.

Подставив (10) в (9) получим:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \nabla T \right) = \nabla \cdot ([D] \nabla T) + \ddot{q}, \quad (11)$$

Уравнение (11) можно также представить в таком виде:

$$\begin{aligned} \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \ddot{q}. \end{aligned} \quad (12)$$

Граничные условия, используемые в рассматриваемой задаче:

1. Температура, действующая на поверхности S_1 . Граничное условие первого рода:

$$T = T^*, \quad (13)$$

где T^* — заданная температура.

2. Тепловой поток, действующий на поверхности S_2 . Граничное условие второго рода:

$$\{q\}^T \{n\} = -q^*, \quad (14)$$

где q^* — заданный тепловой поток; $\{n\}$ — единичный вектор, направленный по нормали к поверхности.

3. Конвекция, действующая на поверхности S_3 . Граничное условие третьего рода:

$$\{q\}^T \{n\} = h_f(T_S - T_B), \quad (15)$$

где h_f — коэффициент теплоотдачи конвекцией; T_S — температура поверхности; T_B — температура окружающей среды.

4. Энергетический баланс для расширенного закона лучистого теплообмена Стефана-Больцмана для системы из N поверхностей:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ji}}{\epsilon_i} - F_{ji} \frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} Q_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{ji}) \sigma T_i^4, \quad (16)$$

где N — число излучающих поверхностей; δ_{ji} — дельта-символ Кронекера; ϵ_i — коэффициент излучения для i -й поверхности; F_{ji} — угловой коэффициент; A_i — площадь i -й поверхности; Q_i — потери энергии на i -й поверхности; σ — постоянная Стефана-Больцмана; T_i — абсолютная температура i -й поверхности.

Угловой коэффициент определяется как доля общей энергии излучения, покидающей поверхность i , к энергии, которая поступает на поверхность j , как показано на рис. 1:

$$F_{ji} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i, \quad (17)$$

где A_j, A_i — площади i -й и j -й поверхностей; r — расстояние между i -й и j -й поверхностями; ϵ_i — коэффициент излучения для i -й поверхности; θ_i — угол между N_i и направлением к поверхности dA_j ; θ_j — угол между N_j

и направлением к поверхности dA_i ; N_i, N_j — нормали к поверхностям dA_i и dA_j .

Подставив выражения (14) и (15) в (10) получим:

$$\{n\}^T [D] \nabla T = -q^*, \quad (18)$$

$$\{n\}^T [D] \nabla T = h_f(T_S - T_B). \quad (19)$$

Умножив уравнение (11) на приращение δT , проинтегрировав по объему и подставив (18) и (19) получим:

$$\iiint_V \left(\rho c \delta T \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \nabla T \right) + \nabla \cdot (\delta T) ([D] \nabla T) \right) dV = \\ = \iint_{S_2} \delta T q^* dS_2 + \iint_{S_3} \delta T h_f (T_B - T) dS_3 + \iiint_V \delta T \ddot{q} dV, \quad (20)$$

где V — объем элемента; δT — возможное приращение температуры, $\delta T = f(x, y, z, t)$.

Как сказано выше, переменная T изменяется как в пространстве, так и во времени. Перепишем эти зависимости:

$$T = \{N\}^T \{T_e\}, \quad (21)$$

где $T = f(x, y, z, t)$ — температура; $\{N\} = \{N(x, y, z, t)\}$ — функция формы элемента; $\{T_e\} = \{T_e(t)\}$ — узловый вектор температуры элемента.

Таким образом, производные по времени уравнения (21) могут быть записаны в виде:

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \{N\}^T \{\dot{T}_e\}, \quad (22)$$

δT имеет тот же вид, что и T :

$$\delta T = \{\delta T_e\}^T \{N\}. \quad (23)$$

Тогда ∇T может быть выражено как:

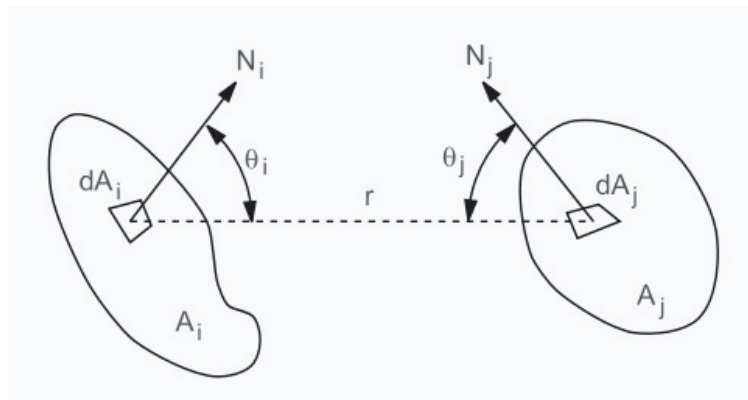


Рис. 1. Расчет угловых коэффициентов

$$\nabla T = [B]\{T_e\}, \quad (24)$$

где $[B] = \nabla\{N\}T$.

Теперь вариационная форма уравнения (20) может быть объединена с уравнениями (21), (22), (23) и (24).

Считаем, что плотность ρ остается постоянной по отношению к объему элемента, а c и $\ddot{q}$ могут изменяться внутри элемента. $\{T_e\}$, $\{\dot{T}_e\}$ и $\{\delta T_e\}$ являются узловыми величинами и не меняются в объеме элемента.

В итоге уравнение может быть записано так:

$$[C_e^t]\{\dot{T}_e\} + ([K_e^{tm}] + [K_e^{tb}] + [K_e^{tc}])\{T_e\} = \{Q_e^f\} + \{Q_e^c\} + \{Q_e^g\}, \quad (25)$$

где $[C_e^t] = \rho \iiint_V c \{N\}\{N\}^T dV$ — матрица удельной теплоемкости элемента;

$[K_e^{tm}] = \rho \iiint_V c \{N\}\{v\}^T [B] dV$ — матрица массовой тепловой проводимости элементов;

$[K_e^{tb}] = \iiint_V [B]^T [D][B] dV$ — матрица диффузионной проводимости элемента;

$[K_e^{tc}] = \iint_{S_3} h_f \{N\}\{N\}^T dS_3$ — матрица конвекционной поверхностной проводимости элемента;

$\{Q_e^f\} = \iint_{S_2} \{N\} q^* dS_2$ — вектор массового потока элемента;

$\{Q_e^c\} = \iint_{S_3} T_b h_f \{N\} dS_3$ — вектор конвективной поверхностной теплоотдачи элемента;

$\{Q_e^g\} = \iiint_V \ddot{q} \{N\} dV$ — тепловая нагрузка элемента.

Для задач фазового перехода матрица определяется по $[C_e^t]$ кривой энтальпии.

Для пояснения способа решения уравнения (25) запишем его в форме:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q^a\}, \quad (26)$$

Процедура, используемая для решения уравнения (26), представляет собой обобщенное правило трапеций:

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + (1-\theta)\Delta t \{\dot{T}_n\} + \theta\Delta t \{\dot{T}_{n+1}\}, \quad (27)$$

где θ — параметр интегрирования по времени; $\Delta t = t_{n+1} - t_n$; $\{T_n\}$ — значение температуры в момент времени t_n ; $\{\dot{T}_n\}$ — значение скорости температуры в момент времени t_n , рассчитанное на предыдущем шаге.

Уравнение (27) может быть записано для шага в момент t_{n+1} :

$$[C]\{\dot{T}_{n+1}\} + [K]\{T_{n+1}\} = \{Q^a\}, \quad (28)$$

Подставив (27) в (28) получим

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t}[C] + [K]\right)\{T_{n+1}\} = \{Q^a\} + [C]\left(\frac{1}{\theta\Delta t}\{T_n\} + \frac{1-\theta}{\theta}\{\dot{T}_{n+1}\}\right). \quad (29)$$

Параметр временного интегрирования θ по умолчанию равен 1. Для задач с фазовым переходом рекомендовано значение 0,5.

В случаях, когда задача является нелинейной, т.е. в случае, когда имеется зависимость $[C(T)]$ или $[K(T)]$, для поиска решения на каждом временном шаге используется итеративный алгоритм Ньютона-Рафсона.

При работе алгоритма решается уравнение вида:

$$[K]\{T\} = \{Q^a\}. \quad (30)$$

Метод решения — алгоритм Ньютона-Рафсона — может быть записан как:

$$[K_i^T]\{\Delta T_i\} = \{Q^a\} - \{Q_i^{nr}\}, \quad (31)$$

$$\{T_{i+1}\} = \{T_i\} + \{\Delta T_i\}, \quad (32)$$

где $[K_i^T]$ — матрица Якоби (матрица касательных); i — индекс текущей итерации; $\{Q_i^{nr}\}$ — вектор внутренней тепловой мощности.

Значения $[K_i^T]$ и $\{Q_i^{nr}\}$ определяются исходя из текущего значения $\{T_i\}$. Правая сторона уравнения (31) — это вектор несбалансированной нагрузки. Решатель итеративно изменяет значение $\{Q_i^{nr}\}$ и пересчитывает $[K_i^T]$, исходя из $\{\Delta T_i\}$, как это показано на рис. 2, до тех пор пока правая сторона уравнения не станет достаточно малой для того чтобы считать подшаг сошедшимся.

Итеративный алгоритм состоит из следующих стадий.

Расчет начинается со значения $\{T_0\}$. $\{T_0\}$ — это вектор температуры с предыдущего подшага (в момент инициализации задачи $\{T_0\} = \{0\}$).

Вычисление обновленной тангенциальной матрицы теплопроводности $\{K_i^T\}$ и вектора внутренней тепло-

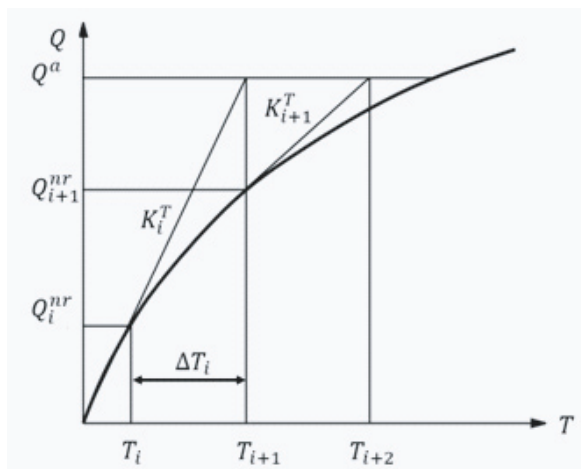


Рис. 2. Пример работы алгоритма Ньютона-Рафсона

вой мощности $\{Q_i^{nr}\}$ производится следующим образом:

Вычисление $\{\Delta T_i\}$ из уравнения (31).

4. Вычисление следующего приближения $\{T_{i+1}\}$ из $\{\Delta T_i\}$ и $\{T_i\}$ по уравнению (32).

5. Повторение этапов 2–4 до достижения сходимости.

Сходимость достигается тогда, когда выполняются условия (33) и/или (34):

$$\|\{Q^a\} - \{Q_i^{nr}\}\| < \varepsilon_R R_{ref}, \quad (33)$$

$$\|\{\Delta T_i\}\| < \varepsilon_T T_{ref}, \quad (34)$$

где ε_R и ε_T — допуски; R_{ref} и T_{ref} — референсные величины.

Операторы нормы векторов вычисляются как корень из суммы квадратов компонент вектора.

Референсное значение R_{ref} вычисляется по формуле:

$$R_{ref} = \|\{Q^a\}\|. \quad (35)$$

Референсное значение T_{ref} вычисляется как показано в (36).

$$T_{ref} = \max \{\Delta T_i\}, \quad (36)$$

где $\{\Delta T_i\}$ — вектор приращения температуры на итерации i .

По умолчанию допуски ε_R и ε_T равны 0.005 и 0.05 соответственно.

Для снижения трудоемкости и ресурсоемкости задачи целесообразно ее представить в двумерной постановке и рассмотреть в ряде характерных сечений стрелочного перевода [8;9]. В качестве примера на рис. 3 показано такое сечение, расположенное в острье остряков.

Конечно-элементная сетка сечения в острье остряков приведена на рис. 4.

Описанная выше методика позволила рассмотреть основные задачи, которые требуется решить при разработке системы электрообогрева стрелочного перевода: определение области плавления при заданном уровне снежного покрова; определение способности противостоять снегопаду при различной высоте снежного слоя; определение влияния скорости ветра на способность противостоять снегопаду и др.

Характерная картина распределения температур в одном из обогреваемых сечений стрелочного перевода при различном числе нагревательных элементов (ТЭНов) приведена на рис. 5.

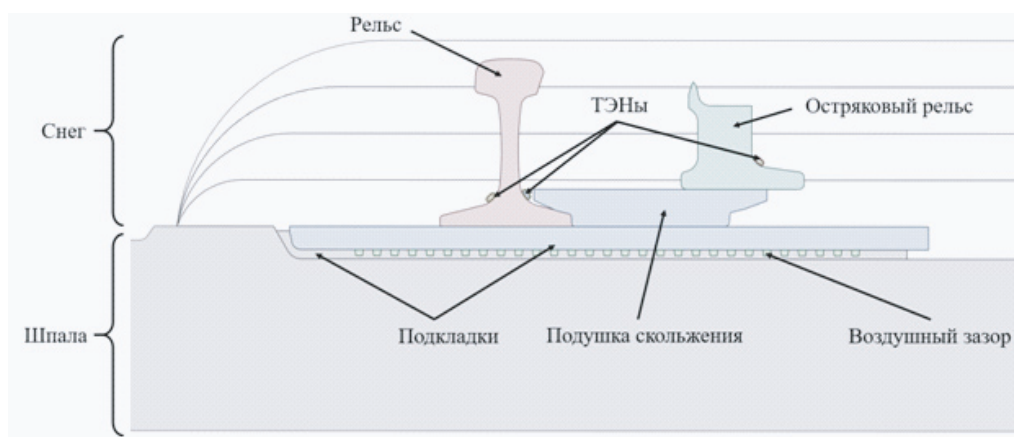


Рис. 3. Расположение элементов стрелочного перевода в острье остряков с обозначениями

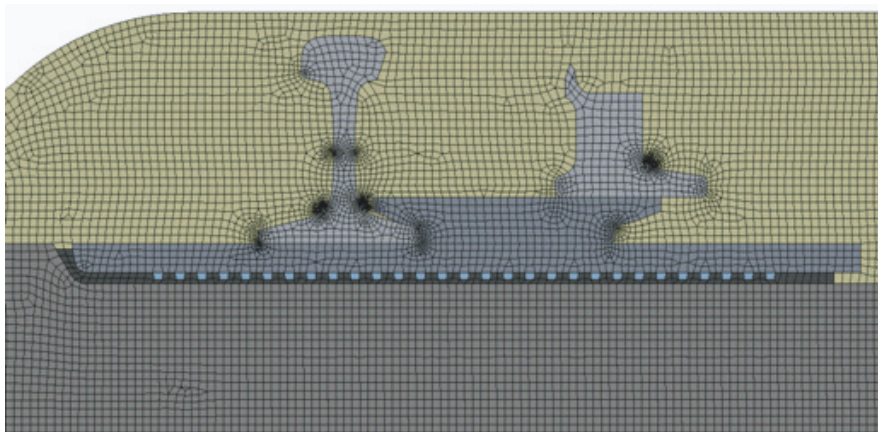


Рис. 4. Конечно-элементная сетка сечения в острие остряков

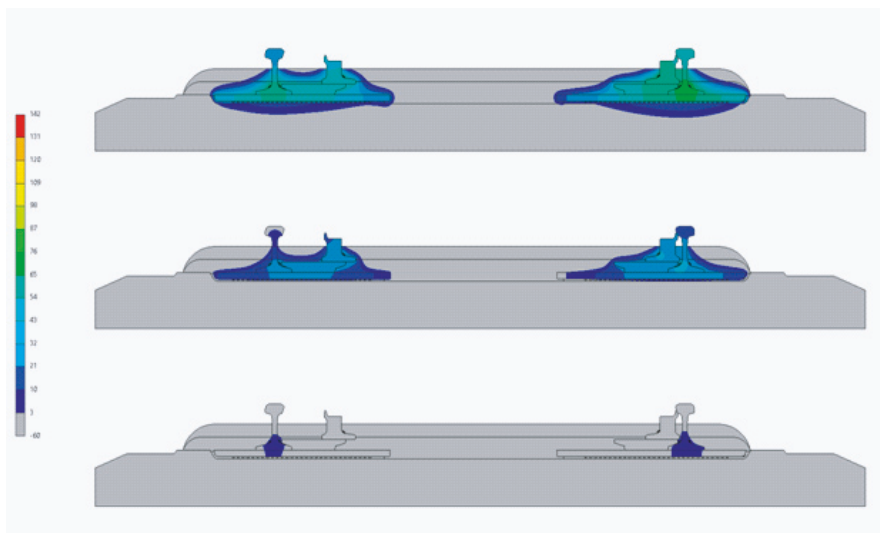


Рис. 5. Распределение температур в элементах стрелочного перевода при температуре окружающей среды -25°C и высоте снега 100 мм в сечении с шириной головки остряка 5 мм через 3 часа после включения системы.
Количество ТЭНов сверху вниз: 6, 4, 2

В результате расчетов были получены необходимые для проектирования системы электрообогрева зависимости: зависимость распределения температур от геометрии сечения и времени работы системы обогрева; зависимость распределения температур от высоты снега; зависимость распределения температур от количества нагревателей и температуры окружающей среды; зависимость распределения температур от снегопада различной интенсивности [10].

Выводы

Вариантные расчеты позволили сформировать предложения по проектированию систем электрообогрева для стрелочных переводов.

В частности, для стрелочных переводов, предназначенных для работы в климатических условиях БАМа и Транссиба:

1. В условиях зим, температура окружающего воздуха в которых часто опускается ниже 25°C , для обогрева стрелок следует применять системы обогрева, которые включают не менее 6 ТЭНов мощностью 500 Вт.

2. В суровых климатических условиях, при которых температура окружающей среды часто может опуститься ниже 35 градусов, даже в этой конфигурации нагревателей система обогрева, состоящая из 6 ТЭНов мощностью 500 Вт, не обеспечивает необходимое удаление снега. В этом случае следует применять системы из 8 и более нагревателей. Мощность ТЭНов в них должна составлять не менее 750–800 Вт. 

Литература

1. Шишкина, И. В. Необходимость разработки стрелочных переводов шестого поколения «ГЕКСА» / И. В. Шишкина. - Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. - 2022. - № 1. - С. 16-18. - EDN: IZZWIV.
2. Глюзберг, Б. Э. Технические требования к стрелочным переводам шестого поколения «гекса» / Б. Э. Глюзберг, В. В. Королев, И. В. Шишкина. - Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. - 2022. - № 7. - С. 19-21. - EDN: DOKXIA.
3. Королев, В. В. Совершенствование технологии очистки стрелочных переводов от снега в зимний период / В. В. Королев. - Текст : непосредственный // История и перспективы развития транспорта на севере России. - 2022. - № 1. - С. 50-55. - EDN: NAILCQ.
4. Королев, В. В. Системы обеспечения безотказной работы стрелочных переводов зимой / В. В. Королев, И. В. Шишкина, Д. С. Колосков. - Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. - 2020. - № 11. - С. 13-16. - EDN: OМУOMK.
5. Глюзберг, Б. Э. Удаление снега на стрелочных переводах / Б. Э. Глюзберг, В. В. Королев. - Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. - 2014. - № 3. - С. 26-30. - EDN: SCBLXJ.
6. Применение методов моделирования для определения скоростей движения по участкам пути, на которых расположены комбинации стрелочных переводов / Б.Э. Глюзберг, А.А. Локтев, В.В. Королев, Д.А. Локтев, Д.Р., П.А. Гелюх, И.В. Шишкина. - Текст : непосредственный // История и перспективы развития транспорта на севере России. - 2018. - № 1. - С. 73-78. - EDN: XUXBYT.
7. Calculation of heat distribution of electric heating systems for turnouts. In Advances in Intelligent Systems and Computing / В. Glusberg, A. Loktev, V. Korolev, I. Shishkina, D. Alexandrova, D. Koloskov (Vol. 982, pp. 337-345). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_31.
8. Исследование микроструктуры рельсовой стали при высокочастотных динамических воздействиях / А.А. Локтев, В.В. Королев, И.В. Шишкина, Е.А. Гридасова, П.А. Никифоров, К.Ю. Тальских. - Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. - 2019. - № 5. - С. 11-15. - EDN: DKVUGZ.
9. Energy efficiency of temperature distribution in electromagnetic welding of rolling stock parts / A. Lyudagovsky, A. Loktev, V. Korolev, I. Shishkina, D. Alexandrova, P. Geluh, D. Loktev // In E3S Web of Conferences (Vol. 110). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001017>.
10. Королев, В. В. Инженерное снеговедение : теплораспределение на стрелочных переводах / В. В. Королев. - Москва: Издательство «Перо», 2021. - 154 с. - ISBN 978-5-00189-509-1. - Текст : непосредственный. - EDN: UQYYCH.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОДАЧИ СОСТАВА ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА, ВЕДОМОГО ЭЛЕКТРОВОЗОМ, НА ПОГРУЗОЧНО-ВЫГРУЗОЧНЫЙ ПУТЬ ПРИ ЧАСТИЧНОМ ОТКАЗЕ ОТ КОНТАКТНОЙ СЕТИ В ПРЕДЕЛАХ ГРУЗОВОГО ФРОНТА



С.П. Вакуленко



А.М. Насыбуллин

Предложен новый подход подачи составов поездов, ведомых электровозом, на погрузочно-выгрузочные пути вагонами вперед без перехода на маневровый порядок движения. Для сокращения продолжительности обработки поездов рекомендовано использование устройства дистанционного видеоконтроля, устанавливаемого на хвостовом вагоне состава.

Ключевые слова: движение вагонами вперед, система видеоконтроля, дистанционный контроль

EDN: ZVIUPA

Актуальность темы исследования определяется инициативами, направленными на стимулирование перевозок грузов железнодорожным транспортом, которые в настоящее время включены в ряд проектов и поручений Правительства Российской Федерации. Проекты включают в себя реализацию доктрин продовольственной безопасности, программ развития Дальнего Востока, развития экспортно-импортных перевозок на Восточном полигоне; увеличение несырьевого экспорта, а также мотивацию аграриев на отправку зерна железнодорожным транспортом и др. При этом большинство проектов, реализуемых на просторах колеи 1520 мм в грузовом движении, направлены на ускорение продвижения маршрут-

ных отправок и освоение транзитных грузопотоков, при этом конкурентоспособность железнодорожного транспорта в нишах перевозки немассовых грузов и освоения коротких внутренних корреспонденций остается крайне низкой.

Отвечая на многочисленные запросы клиентов и бизнес-партнеров ОАО «РЖД», силами специалистов и ученых транспортной отрасли, предложена и доказана целесообразность внедрения прогрессивной технологии перевозок грузовыми поездами постоянного формирования (ГППФ), курсирующими по принципам пассажирских поездов дальнего следования. К технологии перевозок ГППФ можно отнести перевозки грузов поездами «Холодный экспресс» [1],

Вакуленко Сергей Петрович, кандидат технических наук, профессор, директор Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: пропускные и перерабатывающие способности линий и станций, управление вагонными парками, логистика грузовых и пассажирских перевозок, мультимодальные перевозки, транспортные коридоры, техническое оснащение и технология работы станций (всех типов). Автор более 300 научных работ.

Насыбуллин Айрат Марсович, старший преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», заместитель начальника научно-образовательного центра «Независимые комплексные транспортные исследования» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: ускоренные грузовые перевозки, поезда постоянного формирования, городской транспорт, железнодорожные станции и транспортные узлы, грузовые, пригородные и пригородно-городские перевозки, графики движения поездов. Автор 40 научных работ.

Айсина Лилия Ринатовна, старший преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: организация пассажирских и грузовых перевозок железнодорожным транспортом, взаимодействие различных видов транспорта, вилочное движение, моделирование технологических процессов работы железнодорожной станции. Автор 45 научных работ.

разрабатываемый сервис «Ускоренные перевозки грузов» [2], а также проектируемые технические и технологические решения по перегрузке контейнеров из вагона в вагон по прямому варианту без расформирования поездов [3;4].

Реализованные и разрабатываемые проекты схожи по основным технологическим элементам пропуска поездов по участку и технологии их обработки на станциях:

- наличие попутных остановок по маршруту следования;
- прием состава на грузовой фронт поездным порядком;
- выполнение ускоренных грузовых операций без расцепки вагонов и отцепки локомотива от состава поезда.

При этом анализ существующих технико-технологических решений установил, что не разработаны подходы, обеспечивающие работу всех существующих средств механизации на погрузочно-выгрузочном пути при условии приема на него состава поезда, ведомого электровозом.

Для возможности работы всех средств механизации в пределах зоны работы с составами поездов, в ранее опубликованных трудах предложено отказаться от контактной сети (КС) (рис. 1). При этом по концам пути (под местом остановки локомотива) предлагается выделять специализированный участок, оборудованный КС и не препятствующий грузовым операциям, но обеспечивающий питание локомотива. Необходимость нахождения локомотива под участком пути продиктовано возможностью последующего отправления с указанного пути после завершения грузовых операций.

В ранее опубликованных работах авторов [5–7] также отмечалось, что для минимизации эксплуатационных расходов и суммарной продолжительности

нахождения составов на станциях, связанных с маневровыми операциями, необходимо проектировать и/или реконструировать терминалы по сквозному типу, а для возможности проследования участка пути без контактного провода предлагалось принимать поезд накатом (в режиме выбега) за счет заранее запасенной кинетической энергии со скоростью, исключающей вероятность остановки на участке пути без контактной сети (рис. 2) [8]. Под режимом выбега понимается движение состава поезда с выключенными тяговыми двигателями электровоза.

Однако на тех станциях (в том числе и проектируемых), где невозможно проследование поезда в режиме выбега, необходим поиск исчерпывающих и компромиссных подходов для обеспечения приема поезда на пути при частичном отказе от контактной сети, при этом сохраняя основные преимущества технологии поездов постоянного формирования.

Одним из возможных способов приема может стать применение такой технологии, при которой прием состава поезда осуществляется на специализированной пути (пути приема) с последующим изменением направления движения для перестановки состава вагонами вперед (осаживанием) на пути грузового фронта. Перестановка осуществляется таким образом, при котором полз токоприемника электровоза находится под контактным проводом, а вагоны — на участке пути грузового фронта, где контактная сеть не сооружается (рис. 3).

При этом участок контактной сети, предназначенный для питания локомотива во время стоянки, должен соответствовать длине обслуживаемых электровозов, а для обеспечения безопасного расстояния между контактной сетью и началом грузового фронта может применяться способ секционирования, обеспечивающий отключение от напряжения участка контактной сети, расположенного над электровозом.



Рис. 1. Принципиальная (эскизная) схема грузового фронта при частичном отказе от контактной сети в пределах грузового фронта

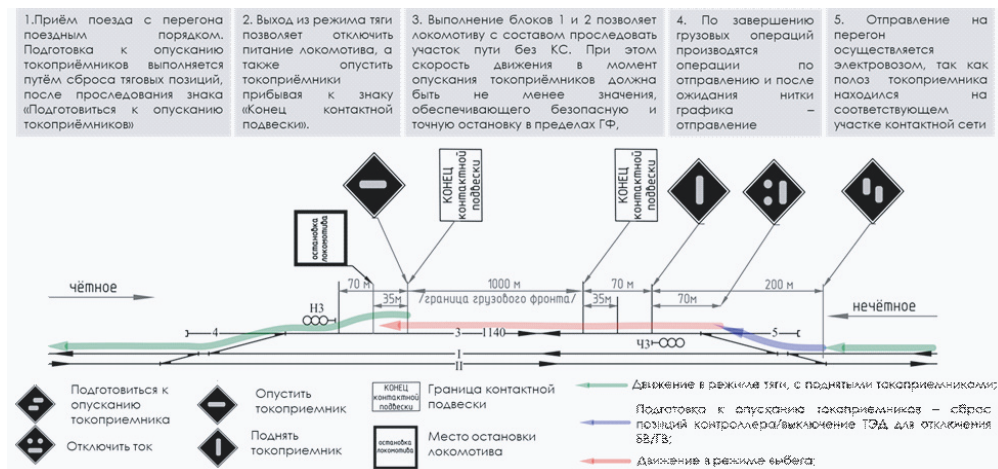


Рис. 2. Последовательность приема грузового поезда в режиме выбега на грузовой фронт с участком пути, свободным от контактной сети

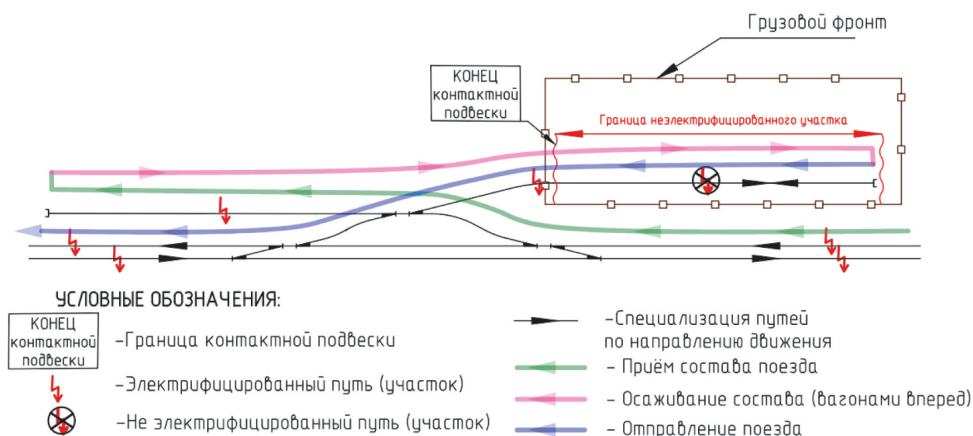


Рис. 3. Принципиальная схема путевого развития для приема состава поезда на погрузочно-выгрузочный путь вагонами вперед

Важно отметить, что схожий технологический прием был рассмотрен учеными ПГУПС [9], однако в исследовании не было акцентировано внимание на наличие противоречивости идеологическим принципам курсирования поездов постоянного формирования, следующих с попутными грузовыми операциями.

Проблема связана с необходимостью минимизации времени на перестановку состава, поскольку такие передвижения возможны только при выполнении следующих условий:

- переход на маневровый порядок передвижения;
- наличие руководителя маневров (составитель поездов) для обеспечения движения вагонами вперед;

- смена кабины управления (при эксплуатации двухсекционных (двухкабинных)) локомотивов;
- производство сокращенного опробования автотормозов (после смены кабины управления) [10].

Кроме того, действующие правила обязывают обеспечить нахождение составителя (руководителя маневров) на хвостовом вагоне, а в условиях отсутствия возможности его проезда (если подножка не предусмотрена конструкцией вагона), составитель при осаживании должен сопровождать состав пешком со скоростью не более 3 км/ч, что является существенным ограничением при длинных маневровых маршрутах.

Со вступлением в силу изменений в Правилах [11], стало возможным избежать необходимость перехода на маневровый порядок при наличии на хвостовом

вагоне системы, обеспечивающей дистанционный контроль из кабины управления свободности железнодорожного пути, подаваемых сигналов и положения стрелок по маршруту следования.

Для исключения перехода на маневровый порядок предлагается применять мобильную систему видеоконтроля [12;13], размещаемую на автосцепном устройстве хвостового вагона (рис. 4), аналогично тому, как размещается телемеханическое устройство управления тормозами «блок хвостового вагона» [14].

Согласно анализу перспективных исследований [12;13;15;16], данная система разработана, продемонстрирована и активно внедряется на станции Нур-Султан (Республика Казахстан) [16].

При применении такой системы локомотивная бригада, находящаяся в кабине управления, сможет осу-

ществлять контроль через получаемое изображение на переносной промышленный планшет или дисплей, установленный на приборной панели локомотива. Изображение может быть получено через беспроводную или проводную (стационарную) связь, а аналогом рассматриваемого решения является визуально-акустическая парковочная система, применяемая на автомобильном транспорте.

С технологической точки зрения система дистанционного видеоконтроля должна быть приписана к соответствующей станции, а установка блока на хвостовой вагон и выдача машинисту планшета должны производиться уполномоченным работником станции после приема поезда и, соответственно, съем блока и изъятие планшета — по завершению необходимости их использования (рис. 5).

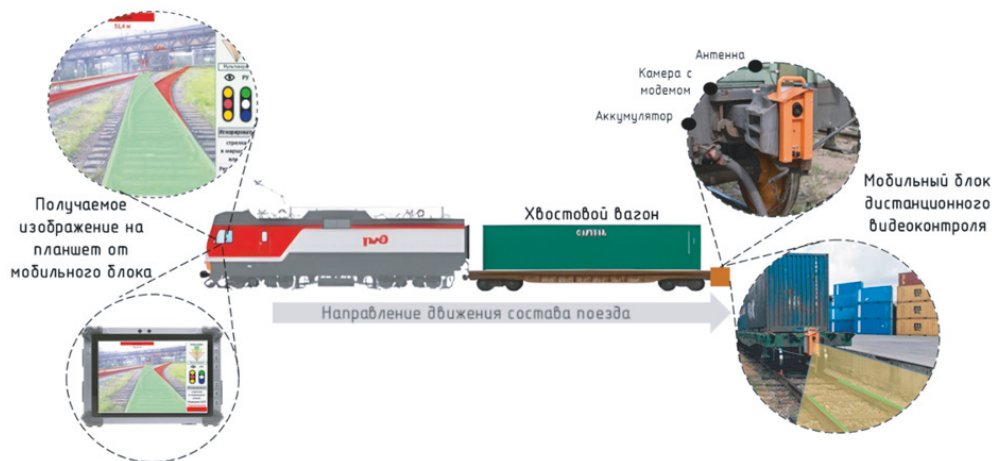


Рис. 4. Принципиальная схема размещения системы дистанционного видеоконтроля на составе поезда для осаживания вагонами вперед поездным порядком



Рис. 5. Пример установки системы дистанционного видеоконтроля на хвостовой вагон (система CTRL@VISION 100WE) [16;17]

При этом необходимо учитывать время на установку и снятие блока, однако эта продолжительность значительно меньше продолжительности операций, связанных со сменой кабины управления, опробованием тормозов и т.д.

На рис. 6 представлена принципиальная технологическая схема обработки состава при его приеме на погрузочно-выгрузочный путь вагонами вперед при условии:

- перехода на маневровый порядок движения;
- без перехода на маневровый порядок движения при применении мобильной системы дистанционного видеоконтроля.

Как видно из рис. 6, применение технологии, исключая переход на маневровый порядок движения, позволяет существенно сократить время обработки состава.

Важно отметить, что для реализации предложенной технологии должны быть рассмотрены другие реше-

ния по путевому развитию станций, так как требуются дополнительные пути приема, обеспечивающие изменение направления движения и дальнейшее осаживание состава (см. рис. 3).

Первые подходы по разработке решений, обеспечивающих прием состава вагонами вперед, представлены в работе [9], авторы которой производят оценку принципиальных вариантов схем путевого развития посредством технико-экономического сравнения. При этом три альтернативные схемы не отражают многообразия возможных вариантов компоновок, что свидетельствует о необходимости в продолжении и углублении исследования с целью формирования исчерпывающих вариантов.

Вопрос о разработке альтернативных схем железнодорожных станций, которые обеспечат преимущества сервисов грузовых перевозок поездами постоянного формирования является предметом дальнейшего исследования.

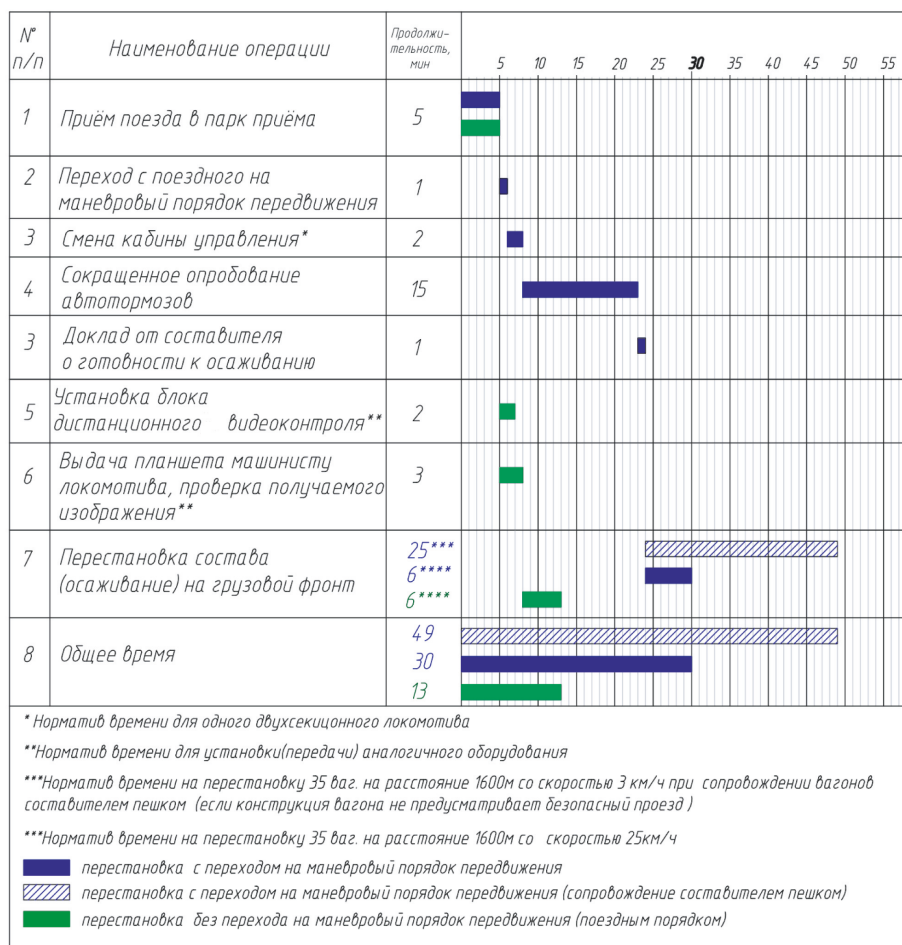


Рис. 6. Принципиальная технологическая схема обработки грузового состава по прибытию

Вывод

Для обеспечения возможности включения в технологию работы станций, схемы которых предусматривают перестановку составов вагонами вперед, должны быть разработаны местные условия по использованию устройств дистанционного видеоконтроля.

При этом технология должна обеспечивать:

- идентификацию показаний светофоров или ручных сигнальных знаков, в том числе и в темное время суток;
- четкую идентификацию расстояния до препятствий (например, с помощью лидаров), особенно при осаживании на тупиковый путь.

Дополнительной областью применения технологии может стать тиражирование для других технологических операций, выполняемых с грузовыми и пассажирскими составами на станциях:

- при подаче пассажирских составов на перронные пути тупиковых станций,
- при длинных маневровых передвижениях на путях общего и необщего пользования, когда вследствие особенностей путевого развития станций отсутствует возможность следования групп вагонов с локомотивом в голове состава;
- при обороте моторвагонных составов на зонных станциях, когда осуществляется переход локомотивной бригады из головы состава в хвост.

Таким образом, в случае успешного тиражирования рассмотренных технико-технологических решений, существуют предпосылки к сокращению потребного количества штата; продолжительности занятия станционных путей; количества маневровых локомотивов; непроизводительного простоя подвижного состава и разгрузке горловин станций. 

Литература

1. Распоряжение ОАО «РЖД» от 5 марта 2020 г. № 493/р. Типовая технология перевозки грузов поездами «Холодный экспресс». - Екатеринбург: УралЮрИздат, 2020. - 24 с. - Текст : непосредственный.
2. Перспективы развития ускоренных грузовых перевозок / С. А. Виноградов, М. И. Мехедов, С. П. Вакуленко, А. Ю. Якубень. - Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. - 2021. - № 4. - С. 10-15.
3. От сортировки вагонов к сортировке контейнеров - контейнеросортировочные хабы на сети железных дорог / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, А. М. Насыбуллин [и др.]. - Текст : непосредственный // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ», Щербинка, 26-27 августа 2021 года. - Щербинка: АО «ВНИИЖТ», 2021. - С. 78-82.
4. Новые подходы к организации переработки контейнеропотоков / С. П. Вакуленко, А. М. Насыбуллин, Л. Р. Айсина [и др.]. - Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. - 2022. - № 11. - С. 4-11.
5. Vakulenko, S. P. Technical solutions for loading and unloading operations on freight trains on an electrified track of a logistic terminal / S. P. Vakulenko, A. M. Nasybullin // T-Comm. - 2020. - Vol. 14, № 4. - P. 66-72. - DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-4-66-72.
6. Критерии выбора железнодорожных станций для размещения грузовых терминалов по обработке контейнерных поездов «Холодный экспресс» / Д. Ю. Роменский, К. И. Шведин, А. М. Насыбуллин, М. В. Роменская. - Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 2021. - Т. 80, № 2. - С. 100-107. - DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-2-100-107.
7. Схемные решения контейнерных площадок для обслуживания поездов сервиса «холодный экспресс» / С. П. Вакуленко, М. И. Мехедов, А. М. Насыбуллин [и др.]. - Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. - 2021. - № 9. - С. 19-25. - DOI 10.365-35/0236-1914-2021-09-3.
8. Вакуленко, С. П. Техничко-технологические решения для обеспечения приема поездов на электрифицированной тяге на погрузочно-выгрузочный путь при частичном отказе от использования контактной сети в пределах грузового фронта / С. П. Вакуленко, А. М. Насыбуллин, Л. Р. Айсина. - Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. - 2023. - № 2. - С. 76-85.

9. Четчуев, М. В. Железнодорожные станции для обслуживания контейнерных перевозок / М. В. Четчуев, В. Г. Четчуева . - Текст : непосредственный // Экономика железных дорог. - 2021. - № 7. - С. 58-67.
10. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества (протокол от 6-7 мая 2014 г. № 60). - Текст : непосредственный.
11. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утверждены приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250. - Текст : непосредственный.
12. Машенко, П.Е. «Глаза» машиниста при движении вагонами вперед / П.Е. Машенко, Е.А. Александров. - Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. - 2021. - №9. - С.42-43.
13. Группа компаний Локотех : официальный сайт . - URL <https://www.locotech.ru/> (дата обращения : 22.11.2023). - Текст : электронный.
14. ОАО МТЗ - ТРАНСМАШ : официальный сайт / Блок хвостового вагона . - URL : <http://catalog-mtz.ru/#/product/blok-hvostovogo-vagona/> (дата обращения : 22.11.2023). - Текст : электронный.
15. Машенко, П.Е. Анализ сенсоров систем технического зрения для нужд промышленного железнодорожного транспорта / П.Е. Машенко, К.В. Шутилов . - Текст : непосредственный // Техника железных дорог. - 2021. - №1 (53). - С.24-29.
16. Ровба, Л. Новую систему дистанционного видеоконтроля презентовали руководству КТЖ / Л.Ровба. - Текст : электронный // Газета «Қазақстан теміржолшысы» (дата публикации : 14.06.2022) . - URL : <https://rail-news.kz/ru/infrastructure/11738-novuiu-sistemu-distancionnogo-videokontrolia-prezentovali-rukovodstvu-qtz.html/>.
17. ООО «ТМХ Интеллектуальные Системы» : официальный сайт / Системы контроля и управления на основе машинного зрения . - URL : <https://tmhsmart.ru/catalog/ctrl-vision/> (дата обращения: 22.11.2023). - Текст : электронный.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТАХ ПАССАЖИРСКОГО КОМПЛЕКСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В статье рассматриваются актуальные вопросы управления дальними пассажирскими перевозками на железнодорожном транспорте. Показана необходимость использования интеллектуальных систем управления не только при организации движения пассажирских поездов, но и при подготовке составов в рейс. Выполнена постановка одной из оптимизационных задач, требующих решения в рамках функционирования такой интеллектуальной системы управления.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, интеллектуальные системы управления, технологические процессы, пунктуальность

EDN: YNESPV



В.Г. Сидоренко



Е.В. Копылова

Пассажирские перевозки играют важную экономическую и социальную роль в жизни любого государства. Железнодорожный транспорт является одним из основных перевозчиков пассажиров в дальнем и пригородном сообщении, а в последние годы занимает значительный сегмент на рынке внутригородских перевозок [1]. Пассажиры предъявляют высокие требования к качеству транспортных услуг, но наиболее высокие требования предъявляются к основной услуге — перевозке. Самыми значимыми факторами для любого пассажира являются продолжительность поездки, надежность ее совершения в соответствии с расписанием, стоимость и комфорт.

Таким образом, можно сказать, что определяющим фактором при организации пассажирских перевозок является соответствие исполненного графика движения поездов нормативному, разработанному с учетом потребностей пассажиров при обеспечении рационального использования ресурсов железнодорожного транспорта [2–4].

Точность выполнения графика движения поездов зависит от результатов работы многих филиалов ОАО «РЖД», а также от перевозчиков, например, в дальнем пассажирском сообщении АО «ФПК».

Актуальным направлением на сегодняшний день является повышение эффективности работы линей-

Сидоренко Валентина Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), Почетный работник сферы образования Российской Федерации, действительный член Российской академии транспорта и Академии электротехнических наук Российской Федерации. Область научных интересов: внедрение цифровых технологий в управление технологическими процессами и бизнес-процессами планирования, управления и обучения на транспорте, создание интеллектуальных систем управления с целью повышения эффективности автоматизированного управления этими процессами, создание цифровых двойников транспортных систем. Автор 265 научных работ. Имеет один патент на изобретение.

Копылова Екатерина Витальевна, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: организация перевозок на железнодорожном транспорте, управление транспортными процессами, логистика пассажирских перевозок, организация работы вокзальных комплексов и транспортно-пересадочных узлов, стандартизация и сертификация услуг, качество транспортных услуг. Автор 64 научных работ.

Туманов Михаил Андреевич, старший преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: организация перевозок на железнодорожном транспорте, управление транспортными процессами, качество транспортных услуг, цифровые технологии, интеллектуальные системы управления на транспорте. Автор 12 научных работ.

ных подразделений филиалов АО «ФПК» за счет автоматизации процессов с использованием современных информационных систем и интеллектуальных алгоритмов управления. Математической постановке этой задачи и посвящена данная статья.

Анализ работы пассажирской технической станции

Выполнение графика движения пассажирских поездов дальнего следования, например, не всегда зависит от оперативных работников филиалов ОАО «РЖД»: Дирекции управления движением, Центральной дирекции инфраструктуры, Дирекции тяги. Подготовка в рейс, включая ремонт, техническое обслуживание и экипировку пассажирских вагонов, находятся в зоне ответственности перевозчика — АО «ФПК».

На качество подготовки вагонов напрямую влияет технология работы линейных объектов, в том числе пассажирских вагонных депо, и четкость выполнения каждой технологической операции [5].

Качество и точность времени подготовки составов в рейс зависят от технологии работы пассажирских технических станций и технических парков. Технология подготовки и экипировки пассажирских составов в рейс должна обеспечивать высококачественное комплексное обслуживание пассажирских вагонов, заключающееся в выполнении технического обслуживания вагонов в соответствии с действующими в ОАО «РЖД» нормативными документами для обеспечения безопасности движения поездов, поддержания санитарно-технического состояния вагонов и создания комфортных условий для обслуживания пассажиров в пути следования [6].

Технологический процесс работы пассажирской технической станции планируется с учетом необходимости уменьшения времени непроизводительного простоя пассажирских вагонов. Наличие особенностей разработки графика и составления расписания движения пассажирских поездов, ориентированных на утреннее отправление пассажиров и вечернее прибытие, вызывает пиковые нагрузки на инфраструктуру пассажирских технических станций и депо [7;8].

Работа всех цехов и подразделений пассажирской технической станции увязывается воедино суточным планом-графиком работы. На пассажирской технической станции могут одновременно выполняться операции по обслуживанию пассажирских поездов своего формирования, оборотных и транзитных пассажирских поездов, для каждого из которых разрабатывается график обработки с учетом выполнения необходимых операций. Технологические операции частично выполняются параллельно с задействованием различных служб и работников, в том числе в

отдельных случаях могут отдаваться на аутсорсинг. В этих условиях возникает ряд сложностей при организации работ, взаимодействии исполнителей и контроле качества.

Преодолеть существующие сложности может помочь интеллектуальная система управления технологическими процессами на линейных объектах пассажирского комплекса железнодорожного транспорта (ИСУ ТП ЛО ПК ЖТ).

Этапы создания ИСУ ТП ЛО ПК ЖТ

В РУТ(МИИТ) накоплен огромный опыт в создании интеллектуальных средств управления, применяемых на железнодорожном транспорте [9–14]. Внедрение ИСУ ТП ЛО ПК ЖТ может приносить несколько видов эффектов:

- коммерческий — рост востребованности у пассажиров за счет повышения уровня безопасности и комфорта;
- ресурсный — сокращение эксплуатационных расходов, например, расхода электроэнергии, простоя подвижного состава, сокращение трудозатрат (в том числе, за счет автоматизации производственных процессов), которое может привести и к сокращению численности человеческих ресурсов;
- предотвращающий ущербы — сокращение эксплуатационных расходов на устранение последствий техногенных катастроф, причиной которых стал человеческий фактор, включая нарушения в эксплуатации подвижного состава;
- социальный — улучшение условий труда за счет повышения равномерности занятости сотрудников;
- научный — расширение баз данных и баз знаний, которые дают возможность дальнейшего развития;
- управленческий — поддержка принятия управленческих решений, позволяющих получить ресурсный, предотвращающий ущербы и социальный эффекты.

При создании интеллектуальных систем управления, в том числе и ИСУ ТП ЛО ПК ЖТ, должны быть решены следующие задачи:

1. Анализ технологических процессов, определение возможности и перспектив автоматизации.

На этом этапе выполняется анализ существующих процессов и нормативной базы, строятся многоуровневые модели существующих технологических и бизнес-процессов *as-is*, осуществляется сбор статистических данных.

2. Формирование круга пользователей с определением уровня доступа к данным и определение требований к пользовательскому интерфейсу.

ИСУ ТП ЛО может рассматриваться как диалоговая система, состав системного и прикладного программного обеспечения, база данных и технических

средств которой определяются множеством тех задач, которые решают пользователи системы в диалоге с ней [15]. Именно поэтому большое значение имеет формирование требований к пользовательскому интерфейсу, в том числе голосовому.

3. Выявление потребности в обмене данными с другими системами и его организация.

На этом этапе строятся модели потоков данных, выявляются системы, являющиеся поставщиками информации для создаваемой системы и потребителями результатов ее работы, выявляются узкие места в организации информационного обмена.

4. Формирование функциональных и оптимизационных моделей.

На этом этапе выполняется построение соответствующих математических моделей и модели данных, оптимизация технологических и бизнес-процессов, дающая возможность построения многоуровневых моделей *to-be*, являющихся основой для последующей автоматизации и выполнения следующих двух этапов, формирования логической структуры базы данных.

5. Создание цифровых двойников объектов.

На этом этапе реализуются цифровые двойники, включающие в себя как «нормативный цифровой двойник», («цифровой технический эталон», «онтологическая модель изделия»), отражающий информацию о том, «как должно быть», так и «цифровую тень», отражающую информацию о том, «как всё есть на самом деле», динамику объекта, используя показания датчиков, связанных с объектом [16].

6. Проектирование, отладка, сопровождение, модификация, эксплуатация системы и анализ полученных результатов.

На этом этапе осуществляется выбор материальной базы (вычислительной техники, датчиков), формируется база данных. Создание программного обеспечения, включая пользовательский интерфейс, производится с использованием *agile*-технологий, которые позволяют учитывать текущие изменения [17].

Первые три этапа можно рассматривать, как подготовительный, исследовательский.

В данной статье представлена разработанная авторами одна из оптимизационных моделей, которая должна войти в состав ИСУ ТП ЛО ПК ЖТ, реализация которой и позволит отнести разрабатываемую систему не просто к классу автоматизированных систем управления, а именно к интеллектуальным транспортным системам, так как ее применение даст возможность осуществлять автоматизированный поиск и принятие к реализации максимально эффективных сценариев управления ЛО ПК ЖТ [18].

Постановка задачи минимизации уровня затрат на выполнение технологического процесса пассажирской технической станции

Критерий $Crit_1$ пунктуальной [19–22], т.е. не допускающей задержек организации технологического процесса пассажирской технической станции (построения суточного плана-графика работы пассажирской технической станции), одновременно обеспечивающей минимальный уровень затрат на выполнение технологического процесса станции, можно сформулировать следующим образом:

$$Crit_1 = \sum_{k=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_O} [C_{Dki} D_{ki} + C_{Rki} R_{ki}] + \lambda \sum_{k=1}^{N_T} \begin{cases} t_{Rk} - t_{pk}, & \text{если } t_{Rk} \leq t_{pk} \\ \infty, & \text{если } t_{Rk} > t_{pk} \end{cases} =$$

$$= \sum_{k=1}^{N_T} \left[\sum_{i=1}^{N_O} [C_{Dki} D_{ki} + C_{Rki} R_{ki}] + \left(\lambda \begin{cases} t_{Rk} - t_{pk}, & \text{если } t_{Rk} \leq t_{pk} \\ \infty, & \text{если } t_{Rk} > t_{pk} \end{cases} \right) \right] \rightarrow \min,$$

где D_{ki} — длительность выполнения операции i -го типа на k -м составе;

C_{Dki} — стоимость единицы времени выполнения операции i -го типа на k -м составе;

R_{ki} — длительность простоя персонала после выполнения операции i -го типа на k -м составе;

C_{Rki} — стоимость единицы времени простоя персонала после выполнения операции i -го типа на k -м составе;

N_O — количество различных операций с составом пассажирского поезда в технологическом процессе;

N_T — количество составов в суточном плане-графике работы пассажирской технической станции;

λ — множитель Лагранжа, позволяющий учесть требование выполнения суточного плана-графика работы пассажирской технической станции;

t_{Rk} — время окончания подготовки k -го состава при заданном суточном плане-графике работы пассажирской технической станции;

t_{pk} — плановое время окончания подготовки k -го состава.

Обязательность выполнения всех операций в соответствии с суточным планом-графиком работы пассажирской технической станции определяет необходимость использования функции штрафа, которая устремляет значение критерия качества $Crit$ к бесконечно большому положительному значению в случае невыполнения требований пунктуальности.

Критерий может быть сформулирован и по-другому, в форме относительного показателя $Crit_2$, более приемлемого для того, чтобы выступать в качестве метрики бизнес-процесса:

$$Crit_2 = \frac{\sum_{k=1}^{N_T} \left[\sum_{i=1}^{N_O} C_{Rki} R_{ki} + \left(\lambda \begin{cases} t_{Rk} - t_{Pk}, & \text{если } t_{Rk} \leq t_{Pk} \\ \infty, & \text{если } t_{Rk} > t_{Pk} \end{cases} \right) \right]}{\sum_{k=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_O} C_{Dki} D_{ki}} \rightarrow \min.$$

Учет последовательности выполнения операций и возможности их параллельного выполнения осуществляется путем построения графовой модели, для которой проводится расчет длительности критического пути, который и определяет время окончания подготовки состава [23]. Существует опыт применения для решения подобных задач генетических алгоритмов [24], в этом направлении и планируют продолжить исследования авторы в будущем.

Заключение

Результатом внедрения в практическую деятельность АО «ФПК» ИСУ ТП ЛО станет:

- обеспечение ритмичности работы линейных подразделений АО «ФПК» во взаимосвязке с технологией работы станций и вокзальных комплексов;
- возможность оперативной корректировки технологического процесса работы линейного подразделения в цифровом формате;
- повышение эффективности технологических и бизнес-процессов на основе встроенного модуля моделирования и формирования предложений по управленческим решениям;
- упрощение процедуры планирования и контроля фактического выполнения технологического процесса и взаимодействия с аутсорсерами и другими участниками процессов.



Литература

1. Организация пассажирских перевозок : учебник / А. Г. Котенко, Е. А. Макарова, И. Н. Шутов [и др.]. — Москва : ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. - 136 с. - ISBN 978-5-89035-968-1. - Текст: непосредственный.
2. Копылова, Е. В. Методические подходы к оценке влияния требований пассажиров к качеству транспортного обслуживания на технологию работы железнодорожного транспорта / Е. В. Копылова, М. А. Туманов. - Текст: непосредственный // Транспортное дело России. - 2018. - № 4. - С. 178-181.
3. Расписание движения поездов с учетом удобства пересадки для пассажиров / С. П. Вакуленко, Л. Р. Айсина, В. Н. Шмаль, А. М. Насыбуллин. - Текст: непосредственный // Экономика железных дорог. - 2022. - № 4. - С. 67-74.
4. Оценка расписания движения поездов с учётом обеспечения удобства пересадки для пассажиров в пути следования / С. П. Вакуленко, Л. Р. Айсина, В. Н. Шмаль, А. М. Насыбуллин. - Текст: непосредственный // История и перспективы развития транспорта на севере России. - 2022. - № 1. - С. 63-66.
5. Пазойский, Ю. О. Разработка имитационной модели пассажирской железнодорожной станций для определения её наличной пропускной способности / Ю. О. Пазойский, В. Н. Шмаль, И. С. Абдуллаев. - Текст: непосредственный // Транспортные системы: тенденции развития : Сборник трудов международной научно-практической конференции, Москва, 26-27 сентября 2016 года ; под общей редакцией Б.А. Лёвина. - Москва: Российский университет транспорта (МИИТ), 2016. - С. 123-126.
6. Типовой технологический процесс работы пассажирской и пассажирской технической станции ОАО «РЖД» : издание официальное : утвержден и введен в действие Распоряжением ОАО «РЖД» от 01 декаб-

ря 2015 г. № 2806р : введен впервые : дата введения 2016-01-15. - URL: <https://base.garant.ru/71332484/> (дата обращения: 26.05.2023). - Текст : электронный.

7. Алгоритм оптимизации числа составов пассажирских поездов в обороте с учетом возможного изменения времени отправления и прибытия поездов на конечные станции / Ю. О. Пазойский, М. Ю. Савельев, А. А. Сидраков, В. А. Шаров . - Текст: непосредственный // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. - 2017. - № 3-5(36). - С. 112-116.

8. Пазойский, Ю. О. Максимизация числа пассажирских поездов дальнего следования в период роста пассажиропотоков за счет интенсификации использования составов поездов . - Текст: непосредственный / Ю. О. Пазойский, М. Ю. Савельев, А. П. Батурин // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. - 2016. - № 9-1(23). - С. 166-171.

9. Баранов, Л.А. Интеллектуальные киберфизические системы управления движением внеуличного транспорта / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко . - Текст: непосредственный // Транспортное строительство. - 2021. - № 3. - С. 27-29.

10. Баранов, Л.А. Интеллектуальные киберфизические системы управления движением внеуличного транспорта (2 часть) / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко . - Текст: непосредственный // Транспортное строительство. - 2021. - № 3. - С. 19-23.

11. Опыт и перспективы автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций / В. Г. Сидоренко, Е. В. Копылова, А. И. Сафронов, М. А. Туманов . - Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. - 2023. - Т. 9 , № 1. - С. 33-48.

12. Патент № 279135 . Российская Федерация . МПК В61L 27/04(2006.01) В61L 27/60(2022.01). Интеллектуальный комплекс управления перевозочным процессом городской рельсовой транспортной системы (ГРТС) : № 2022113881 : заявл. 24.05.2022 : опубликовано 07.03.2023 / Балакина Е.П., Баранов Л.А., Ершов А.В., Кулагин М.А., Логинова Л.Н., Сафронов А.И., Сидоренко В.Г.; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)) . - 14 с. : ил. - Текст : непосредственный.

13. Козлов, П. А. О согласованном структурно-функциональном построении железнодорожных станций / П. А. Козлов, В. С. Колокольников. - Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. - 2017. - №3. - С. 106-110.

14. Козлов, П. А. Использование автоматизированного анализа на железнодорожном транспорте / П. А. Козлов, О. В. Осокин, Н. А. Тушин . - Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. - 2012. - № 1. - С. 24-31.

15. Методы анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем / Н.А. Кузнецов, В.В. Кульба, С.С. Ковалевский, С.А. Косяченко. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 797 с. - Текст: непосредственный.

16. «Техэксперт»: SMART-стандарты — основа для создания цифровых двойников. - Текст : электронный // Консорциум Кодекс : [сайт] - 2023. - URL: <https://cntd.ru/industriya-4-0.ru/digital> (дата обращения: 28.05.2023).

17. Лозгачева, Т.М. Agile и научная организация труда : практика применения гибких методов в России / Т. М. Лозгачева, О.А. Табекина, О.В. Федотова . - Текст : непосредственный // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Экономика и управление. - 2019. - Т. 5 (71), № 2. - С. 48-59 .

18. ГОСТ Р 56829-2015. Интеллектуальные транспортные системы. Термины и определения = Intelligent transport systems. Terms and definitions : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 декабря 2015 г. № 2150-ст : введен впервые : дата введения 2016- 06-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт интеллектуальных транспортных систем» (ОО «НИИ ИТС»). - Москва : Стандартинформ, 2018. - 16 с. - Текст: непосредственный.

19. Юсипов, Р. А. Оперативное нормирование технологических операций / Р.А. Юсипов . - Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. - 2001. - №8. - С. 61-63.

20. Davydov, B. Optimal rescheduling for the mixed passenger and freight line / B. Davydov, B. Dynkin, V. Chebotarev // WIT Transactions on The Built Environment. - 2014. - Vol. 135. - P. 649-661. - Текст : непосредственный.

21. Cordeau, J.-F. A survey of optimization models for train routing and scheduling / J.-F. Cordeau, P. Toth, D. Vigo // *Transportation Science*. - 1998. - Vol. 32(4). - P. 380-404. - Текст : непосредственный.
22. Эсаулов, В. А. Методика повышения пунктуальности грузовых перевозок на железнодорожном транспорте / В. А. Эсаулов . - Текст : непосредственный // Молодые ученые — Хабаровскому краю : Материалы XXIII краевого конкурса молодых ученых, Хабаровск, 12-19 января 2021 года. - Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2021. - С. 197-202.
23. Шахова, Е. Ю. Поиск критических путей в графе / Е. Ю. Шахова, Е. А. Платошечкин. - Текст : непосредственный // Труды Братского государственного университета. Серия : Естественные и инженерные науки. - 2008. - Т. 1. - С. 138-142.
24. Markevich, A. Automating of Human Resources Management using Genetic Algorithms / A. Markevich, V. Sidorenko // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). - IEEE, 2019. - P. 1-9. - Текст: непосредственный.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ СНИЖЕНИИ УРОВНЯ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ РАБОТНИКОВ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД ТЕПЛОВОЗОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОЛОГИИ ОЦЕНКИ РИСКА

Работники локомотивных бригад, эксплуатирующие тепловозы, подвергаются воздействию химического загрязнения воздуха рабочей зоны. Часть загрязнителей обладает канцерогенным действием. При работе на длительно эксплуатируемых тепловозах канцерогенный риск составляет $5,22 \cdot 10^{-3}$. Вероятно формирование ежегодно 52 дополнительных случаев канцерогенной патологии на 10 000 работников.

Ключевые слова: работники локомотивных бригад, воздух рабочей зоны, канцерогенный риск, экономические затраты



Л.А. Леванчук



О.И. Копытенкова

EDN: GHKGRI

Здоровье и профессиональная трудоспособность работников локомотивных бригад (РЛБ) является одной из важнейших задач обеспечения безопасности перевозочного процесса. В настоящее время амортизация парка локомотивов составляет 59% [1;2]. РЛБ, эксплуатирующие тепловозы с высокой степенью амортизации, подвергаются воздействию химического загрязнения воздуха рабочей зоны. Часть загрязнителей обладает канцерогенным действием.

Формирование онкологической патологии у РЛБ приводит к прекращению их профессиональной деятельности, негативным социальным последствиям и значительным финансовым затратам [3–10].

Цель исследования является определение экономического эффекта при снижении уровня формирования онкологической патологии работников локомотивных бригад тепловозов за счет реализации профилактических мероприятий.

Леванчук Леонид Александрович, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). Область научных интересов: охрана труда, организация риск-ориентированного контроля безопасности производственной деятельности. Автор 32 научных работ, в том числе одной монографии. Имеет два патента и 5 свидетельств на программы для ЭВМ и базы данных.

Копытенкова Ольга Ивановна, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), главный научный сотрудник ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья». Область научных интересов: гигиеническая оценка условий труда, оценка риска здоровью населения. Автор 165 научных работ, в том числе шести монографий и девяти методических рекомендаций. Имеет восемь патентов и 10 свидетельств на программы для ЭВМ и базы данных.

Вильк Михаил Франкович, доктор медицинских наук, профессор, директор ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт гигиены транспорта» (ВНИИЖГ Роспотребнадзора), член-корреспондент РАН. Область научных интересов: гигиена транспорта. Автор более 200 научных работ, в том числе 20 монографий, 11 руководств и учебных пособий.

Сачкова Оксана Сергеевна, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории коммунальной гигиены и эпидемиологии отдела медико-биологических исследований ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт гигиены транспорта» (ВНИИЖГ Роспотребнадзора), профессор кафедры «Техносферная безопасность» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: исследование полимерсодержащих материалов для железнодорожного транспорта, гигиеническая сертификация подвижного состава железнодорожного транспорта. Автор более 200 научных работ, в том числе пяти монографий, четырех учебников и восьми учебных пособий. Имеет пять патентов на изобретения.

Кочнев Виктор Андреевич, соискатель кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: автоматизированные системы мониторинга транспортных средств, безопасность жизнедеятельности на транспорте. Автор девяти научных работ.

Материалы и методы

Перечень веществ, обладающих канцерогенным действием уточнен в соответствии с «Руководством ЕМЕП/ЕАОС по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ 1.А.3.с.». Для оценки уровня загрязнения использовали СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Расчет показателей канцерогенного риска РЛБ, эксплуатирующих тепловозы, проведен в соответствии с Р 2.1.10.1-920-04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду: утв.: первым заместителем министра здравоохранения Российской Федерации, главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 5 марта 2004 г. - М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. - 143 с.».

Определение социально-экономической эффективности от внедрения мероприятий проведено с использованием методики А.В. Концевой, Ю.А. Балановой, А.О. Мырзаматовой (2020).

Результаты

В воздух рабочей зоны при эксплуатации тепловозов поступают вещества — продукты сгорания топлива. Источник выбросов находится в непосредственной близости от работников, загрязнители проникают в кабину тепловоза вследствие ее негерметичности.

На объем расхода топлива и, как следствие, количество отработавших и картерных газов, существенное влияние оказывает срок эксплуатации тепловозов [11]. Известно, что отработавшие газы содержат около 200 компонентов. В соответствии с данными по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в процессе исследования состава загрязнителей, в перечень загрязнителей включены: крупные и мелкодисперсные пылевые частицы, NO_2 , соединения тяжелых металлов, полиароматические углеводороды (ПАУ), летучие органические соединения (ЛОС).

Расчет загрязнения воздушной среды около работающего тепловоза выполнены по 11 ингредиентам. Результаты использованы при определении величины канцерогенного риска РЛБ, работающих на новых и длительно эксплуатируемых тепловозах. Расчеты, выполненные в соответствии с действующей нормативной документацией позволили установить, что при работе на длительно эксплуатируемых тепловозах канцерогенный риск составляет $5,22 \cdot 10^{-3}$. Следовательно вероятно формирование ежегодно 52 дополнительных случая канцерогенной патологии

на 10 000 работников. В группе РЛБ, работающих на новых марках тепловозов, канцерогенный риск составляет $3,78 \cdot 10^{-3}$, т.е. 37,8 дополнительных случаев, т.е. на 14 случаев меньше на 10 000 работников. Расчеты, проведенные с учетом числа машинистов и помощников машинистов работающих, на новых и длительно эксплуатируемых тепловозах, показали, что в существующей ситуации имеется риск ежегодного формирования 225 случаев онкопатологии. Проведение во время капитально-восстановительного ремонта локомотивов восстановление уплотнения окон кабины тепловоза приведет к снижению инфильтрации загрязненного отработавшими газами воздуха рабочей зоны РЛБ и позволит сократить риск онкологической патологии на 15% (35 случаев ежегодно). При этом электрификация железных дорог должна довести риск онкологической патологии за счет воздействия отработавших газов до 10^{-5} , т.е. до приемлемого уровня.

Электрификация железных дорог позволит снизить риск патологии до приемлемых величин 10^{-5} (предотвратить ежегодно до 225 случаев онкологического заболевания).

Показатели снижения затрат и потерь при реализации мер по улучшению условий труда представлены в таблице.

Обсуждение

Реализация мероприятий, направленных на улучшение условий труда машинистов тепловозов и их помощников приведет к сокращению заболеваемости онкологической патологией. Установлено, что суммарная величина затрат и потерь на оказание медицинской помощи, лечение, выплаты пособий по временной утрате трудоспособности и инвалидности при формировании онкологической патологии, рассчитанная в соответствии с [12], ежегодно составляет 97,4 млн рублей. Реализация мероприятий по улучшению условий труда позволит снизить затраты и потери на 14,6 млн рублей ежегодно.

Выводы

Реализация программы ОАО «РЖД», направленной на электрификацию железных дорог позволит предотвратить 225 случаев онкологической патологии среди машинистов тепловозов и их помощников, позволит продлить профессиональное долголетие РЛБ и сократить затраты и потери только от онкологической патологии на 97,4 млн рублей ежегодно. Проведение капитально-восстановительного ремонта кабин длительно эксплуатируемых тепловозов позволит предотвратить 35 случаев онкологической патологии и снизить затраты и потери на 14,6 млн рублей ежегодно. 

Таблица

**Показатели снижения затрат и потерь при реализации мер
по улучшению условий труда (миллион рублей ежегодно)**

Показатель	Затраты и потери	Снижение затрат и потерь
Прямые медицинские затраты	48,57	–7,28
Выплаты пособий по ВУТ	3,20	–0,48
Выплаты пенсий по инвалидности	5,44	–0,82
Прямые затраты по графе «Всего»	57,21	–8,58
Потери ВВП в связи с инвалидностью	1,23	–0,18
Потери ВВП от преждевременной смертности	38,93	–5,83
Всего затраты и потери	97,37	–14,59

Литература

1. Сводная таблица локомотивов и моторвагонного подвижного состава отечественных железных дорог. - URL : https://www.rosstat.gov.ru/Publ_TR_2021.docx (дата обращения : 13.01.2021). - Текст : электронный.
2. Выступление председателя правления ОАО «РЖД» О. Белозёрова на заседании Совета по взаимодействию компании с предприятиями транспортного машиностроения. - URL : <https://www.metalinfo.ru/ru/news/127865> (дата обращения : 14.01.2021). - Текст : электронный.
3. Вопросы охраны труда, здоровья и организационно-методические аспекты определения функционального состояния машинистов локомотивных бригад / А.И. Гоженко, Л.П. Зарицкая, А.А. Мальгота [и др.] . - Текст : непосредственный // Актуальные проблемы транспортной медицины. - 2013. - № 2-2 (32). - С. 009-013.
4. Каськов, Ю.Н. Современное состояние и решение вопросов санэпидблагополучия на объектах железнодорожного транспорта России / Ю.Н. Каськов, Ю.И. Подкорытов. - Текст : электронный // Гигиена и санитария. - 2012. - Т. 91, № 5. - С. 37–40. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyaniye-i-reshenie-voprosov-sanepidblagopoluchiya-na-obektah-zheleznodorozhnogo-transporta-rossii> (дата обращения: 25.04.2021).
5. Регулирование профессионально-ассоциированных производственных воздействий на работников железнодорожного транспорта: опыт России и других стран / В.А. Логинова, Ю.Н. Каськов, Е.А. Жидкова [и др.] . - Текст : непосредственный // Анализ риска здоровью. - 2021. - № 1. - С. 173-185. - DOI: 10.21668/health.risk/2021.
6. Динамика производственного риска и показателей профессиональной заболеваемости работников железнодорожного транспорта / М.Ф. Вильк, Ю.Н. Каськов, В.А. Капцов, В.Б. Панкова. - Текст : непосредственный // Медицина труда и экология человека. - 2020. - № 1 (21). - С. 49-59. - DOI: 10.24411/2-411-3794-2020-10105.
7. Каськов, Ю.Н. Гигиеническая оценка условий труда работников локомотивных бригад / Ю.Н. Каськов, В.А. Логинова, С.Д. Кривуля. - Текст : непосредственный // Здоровье населения и среда обитания. - 2017. - № 2 (287). - С. 18-21. - DOI: 10.35627/2219-5238/2017-287-2-18-21.
8. Логинова, В.А. Гигиеническая оценка условий труда и профессионального риска здоровью работников на объектах железнодорожного транспорта / В.А. Логинова. - Текст : непосредственный // Анализ риска здоровью. - 2017. - № 2. - С. 96-101. - DOI: 10.21668/health.risk/2017.2.10.
9. Медико-социальная характеристика и производственные факторы риска работников локомотивных бригад / Е.А. Жидкова, Е.М. Гутор, М.Ф. Вильк, Г.Г. Онищенко [и др.] . - Текст : непосредственный // Гигиена и санитария. - 2020. - Т. 99, № 12. - С. 1380 - 1385. - DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1380-1385.

10. Медико-социальная характеристика и производственные факторы риска работников локомотивных бригад / Е.А. Жидкова, Е.М. Готор, М.Ф. Вильк, Г.Г. Онищенко [и др.] . - Текст : непосредственный // Гигиена и санитария. - 2020. - Т. 99, № 12. - С. 1380 - 1385. - DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1380-1385.
11. Энергосбережение на железнодорожном транспорте : учебник [В. А. Гапанович [и др.]; под ред. В. А. Гапановича. - Москва : Издательский дом МИСИС, 2012. - 619 с. - Текст : непосредственный.
12. Экономический ущерб онкологических заболеваний, ассоциированных с модифицируемыми факторами риска / А.В. Концевая, Ю.А. Баланова, А.О. Мырзаматова [и др.] . - Текст : непосредственный // Анализ риска здоровью. - 2020. - № 1. - С. 133-141. - DOI: 10.21668/health.risk/2020.1.15.
13. Леванчук , Л.А. Обоснование комплекса мероприятий по обеспечению безопасности производственного процесса работников локомотивных бригад: специальность 2.9.10 «Техносферная безопасность транспортных систем» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Леванчук Леонид Александрович ; Российский университет транспорта . - Москва, 2022. - 149 с. - Текст : непосредственный.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЙ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

Статья посвящена вопросу очистки сточных вод транспортных предприятий от селеноорганических соединений. Исследована адсорбция препарата ДАФС – 25 из этилового спирта на цеолите NaX, силикагеле МСК и адсорбенте $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$. Установлено, что ранее методы очистки сточных вод от селеносодержащих соединений в транспортной отрасли не применялись. Использование рассмотренного метода адсорбции представляется эффективным решением обозначенной проблемы.

Ключевые слова: адсорбция, ДАФС-25, силикагель, метод избыточных величин Гиббса, загрязнение водоемов, сточные воды

EDN: NZUHVV



А.А. Демидов



А.В. Матешева

Существенные проблемы экологической безопасности транспорта заключаются в образовании больших объемов сточных вод. В ходе деятельности предприятий транспортной отрасли увеличивается уровень загрязнения подземных вод и поверхностных водоемов различными химическими продуктами и соединениями. Одним из загрязнителей является селен (Se).

Ввиду этого, исследования в области повышения эффективности очистки сточных вод от селеноорганических соединений являются актуальными. Крайне эффективными и экологически приемлемыми способами очистки зарекомендовали себя адсорбционные методы. Они позволяют осуществить удаление широкого спектра загрязнений до допустимых (безопасных) уровней, независимо от их химической природы.

Адсорбционные методы характеризуются отсутствием вторичных загрязнений, позволяют быстро подобрать необходимые сорбенты и осуществлять управление процессом сорбции.

На данный момент было проведено мало исследований в области адсорбции гетероароматических соединений, содержащих серу и селен, а также дикетон. Согласно проведенному анализу научных работ [1] установлено, что при X-Г методе с применением пламенно-ионизационного детектора для определения удерживаемых объемов, выяснено, что соединения, содержащие селен, обладают более сильной адсорбцией по сравнению с аналогичными S-содержащими веществами. В условиях равновесной хроматографии при незначительных перепадах давления объем, удерживаемый на единицу площади адсорбента, является

Демидов Артем Андреевич, аспирант кафедры «Химия и инженерная экология» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: электрохимические методы анализа, загрязнение водной среды, экологическая безопасность транспортных систем. Автор 41 научной работы.

Матешева Анна Владимировна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории моделирования атмосферного переноса Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, доцент, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: экологическая безопасность транспортных систем, экологические риски для человека, загрязнение производственной среды. Автор 91 научной работы.

Пашин Валерий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Химия и инженерная экология» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: химическая безопасность, экологическая безопасность транспортных систем. Автор 174 научных работ.

постоянной Генри адсорбционного равновесия. Это позволило авторам П.Б. Даллакяну и др. [2] определить атомно-молекулярные потенциалы $\Phi_{S...C}$ и $\Phi_{Se...C}$ по экспериментальным термодинамическим характеристикам адсорбции. В своем исследовании А.А. Вольцов и др. [3] использовали метод ИК-спектроскопии для изучения механизма адсорбции различных соединений, таких как тиофан, тиофен, метил- и этилмеркаптаны и сероводород с использованием цеолитов типа Y. Они выяснили, что связь S-H меркаптанов чувствительна к взаимодействию с обменными катионами меди цеолитов и в процессе адсорбции и десорбции при повышенных температурах происходит разрушение частиц адсорбированных молекул, образующих соединения с группировками $=C-H$, $C=C$, $C=O$, $S-O$, $S-S$, $O-H$. В других исследованиях [3;4] также была изучена адсорбция препарата ДАФС-25 из C_7H_8 , $C_6H_{14}O$ на адсорбентах различной химической природы. В настоящей работе поставлена задача исследовать адсорбцию данного препарата из этилового спирта.

Экспериментальная часть и результаты исследования

Для проведения эксперимента крупнопористый силикагель МСК был подвержен продолжительному кипячению и отмывался раствором HCl для удаления ионов Fe. Далее его промыли дистиллированной водой, чтобы избавиться от ионов Cl и поместили в сушильный шкаф при $t=450K$ до постоянного веса. Перед проведением эксперимента силикагель также просушивался в течение двух часов при $t=473K$. Концентрация $C_{(OH^-)}$ -групп силикагелей составляла $70-95 \cdot 10^{-5}$ моль/м² или 4,2 – 5,7 групп OH^- на $100 A^2$. Перед адсорбционными испытаниями $Ca(CH_3COO)_2$ прокаливали в течение 120 минут при температуре 393 K. Цеолит NaX дегидратировали при температуре 770–825K в течение 5 часов.

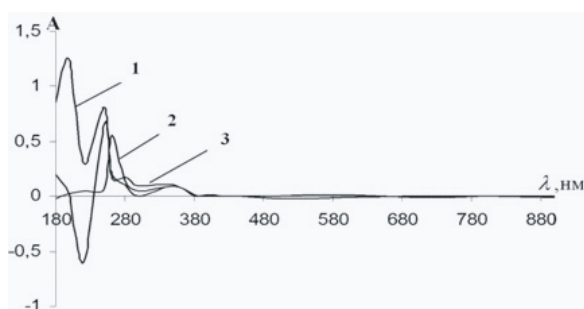


Рис. 1. УФС препарата ДАФС-25 в растворителях:
1- CH_3CN ; 2- $C_6H_{12}O_2$; 3- C_4H_9OH

Используемый спектрофотометр HP 8452 A позволил снять изотермы адсорбции. На основе анализа полученных УФ-спектров (УФС) указывалась область максимума поглощения в зависимости от которой снимали значения оптической плотности. УФС препарата ДАФС-25 свидетельствуют, что область максимума поглощения приблизительно одинакова во всех испытываемых растворителях. Значение области максимума составляет 245–275 нанометров. Указанные УФС с обозначением пиков для различных растворителей изображены на рис. 1,2.

Аналогично работам [3;4] определили состав равновесного раствора, используя градуированные зависимости ОП от концентрации изначального раствора. Произвели расчеты величины избыточной адсорбции.

В исследовании рассматривалась адсорбция ДАФС-25 из C_2H_5OH на таких адсорбентах как цеолит NaX и силикагель МСК в области сильно разбавленных растворов. При этом полученные изотермы позволили сделать вывод, что в начальной области концентраций поведение изотерм имеет схожий (одинаковый) характер. При достижении мольной доли $X_1=4 \cdot 10^{-4}$ моль/л наблюдается резкий рост избыточных величин адсорбции системы, содержащей силикагель МСК. Аналогичное поведение изотерм зафиксировано при адсорбции из ДИПЭ($C_6H_{14}O$) и C_7H_8 [3;4]. Подобие данных явлений заключается в природе адсорбентов. При достижении указанной мольной доли значение избыточной адсорбции возрастает примерно в 5 раз. Полученные изотермы отражены на рис. 3.

Известно, что силанольные группы ($\equiv Si-OH$) способны образовывать водородные связи с молекулами групп «В» и «Д». Это факт позволяет получать относительно высокие значения адсорбции системы с силикагелем (так как на его поверхности имеются силанольные группы). $-H-$ групп «В» и «Д» претерпевает частичное протонизирование $-p^+$.

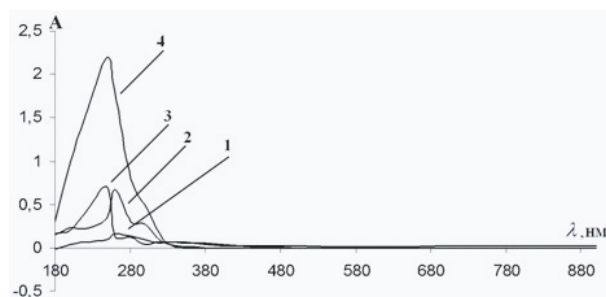


Рис. 2. УФС препарата ДАФС-25 в растворителях:
1- C_3H_7NO (ДМФА); 2- $C_4H_8O_2$; 3- C_2H_5OH ; 4- C_3H_8O

Ввиду этого на поверхности гидроксированных силикагелей присутствуют локально сосредоточенные положительные заряды (p^+).

Для крупнопористых (размером $\sim 50 \text{ \AA}$) и непористых силикагелей свойства единицы поверхности подобны, если выполняется условие равной степени гидратации. Такое сходство получается вследствие того, что концентрация $C_{(\text{OH}^-)}$ -групп равна $70\text{--}95 \cdot 10^{-5}$ моль/м². Ввиду этого протекание адсорбции ДАФС-25 на АСК и МСК одинаково.

При рассмотрении e^- — донорного звена функциональных групп на поверхности силикагеля, было подтверждено, что они являются основными центрами в процессе адсорбции. Взаимодействие между молекулами и поверхностными -ОН группами силикагеля приводит к молекулярной адсорбции.

Из возможных механизмов адсорбции наиболее вероятным является хемосорбция, которая подразумевает, что адсорбируемые молекулы ориентированы таким образом, что взаимодействие с поверхностью происходит через полярные группы, а углеводородные радикалы обращены к раствору. Предполагается, что в адсорбционном процессе на силикагелях большую роль играет эффективный объем, который определяется воздействием карбонильной группы.

Экспериментальным путем было установлено, что адсорбция на цеолите происходит в намного меньшей степени, чем на $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ и силикагеле. Из-за превышения координационного числа Al над его валентностью, алюмоокислородный тетраэдр $[\text{AlO}_4]^-$ получает единичный отрицательный заряд, распределенный по внутренним связям O-Al и представляет собой комплексный анион. Поскольку компенсирующий положительный заряд сосредоточен в обменных катионах меньшего радиуса, структура цеолита

определяет свойства катионированных цеолитов как специфических молекулярных адсорбентов II типа по классификации Киселева. Это означает, что на поверхности таких адсорбентов сосредоточены положительные заряды (катионы малого радиуса), расположенные около больших комплексных анионов. Наличие катионов в полостях цеолитов приводит к проявлению разных форм адсорбционного взаимодействия, начиная электростатическим и заканчивая дисперсионным. Электростатическое взаимодействие играет особую роль в адсорбции на цеолитах, так как оно становится более сильным, когда молекулы адсорбента являются асимметричными. Очевидно, что адсорбция данного 1,5-дикетона протекает на катионах при участии алюмосиликатного каркаса. Молекулы 1,5-дикетона со связями, где локально сосредоточена электронная плотность на периферии, способны к сильному специфическому взаимодействию с катионами цеолитов. Основная роль при молекулярном взаимодействии с катионами цеолитов отводится локальному сосредоточению электронной плотности в отдельных связях молекул. Взаимное вытеснение определяется в значительной степени геометрическим строением при совместной адсорбции молекул с различной электронной структурой.

На рис. 4 продемонстрировано, что значения избыточной адсорбции на угле являются существенными. Это явление, очевидно, связано с увеличением энергии адсорбционного потенциала микропор угля в сравнении с потенциалом более широких пор других адсорбентов. Молекулы начинают заполнять тонкие поры уже при относительно небольших концентрациях адсорбата в растворах.

При исследовании термодинамического состояния адсорбционных систем был задействован метод

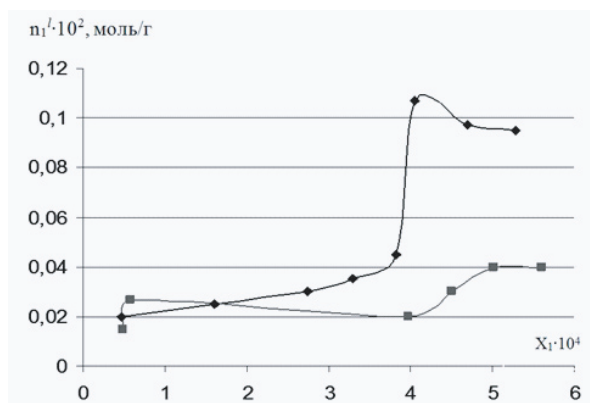


Рис. 3. Изотермы адсорбции систем:
X – ДАФС-25 – $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ – цеолит NaX;
Y – ДАФС-25 – $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ – силикагель МСК

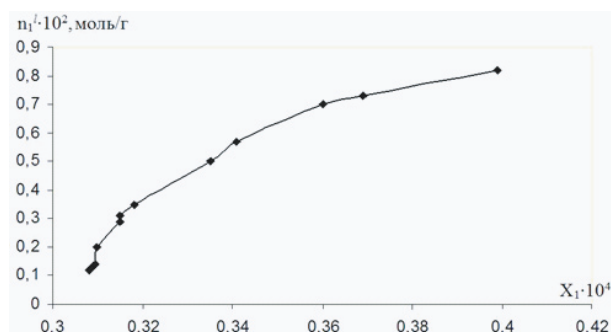


Рис. 4. Изотермы адсорбции системы
ДАФС-25 – $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ – $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$

избыточных величин Гиббса. С использованием экспериментальных данных по избыточным величинам адсорбции были определены основные термодинамические параметры сорбционных систем.

Уравнение изменения химического потенциала сорбента:

$$-\Delta\Phi = -(\Phi_{x_1} - \Phi_{x_2}) = RT \int_0^{x_1\gamma_1} \frac{n_1^l}{x_2 x_1 \gamma_1} d(x_1 \gamma_1).$$

Рассчитанные значения свободной энергии Гиббса (G) для систем, рассматриваемых в работе, при адсорбции сравнивались со значениями, представленными в работах [3–5] в растворах с мольной долей $5 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Расчеты показали, что ΔG составляет:

1. $\Delta G_{\text{дипл}} = -0,5 \cdot 10^{-2}$;
2. $\Delta G_{\text{C}_7\text{H}_8} = -0,1 \cdot 10^{-2}$;
3. $\Delta G_{\text{C}_9\text{H}_5\text{OH}} = -1,8 \cdot 10^{-4}$.

Заключение

На сегодняшний день методы очистки сточных вод от селеносодержащих соединений для объектов транспортной отрасли не применяются. Проведенные опытным путем исследования систем (препарат ДАФС-25—растворитель—адсорбент) позволили изучить влияние растворителя и адсорбента на процесс адсорбции. При применении растворителя $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$; адсорбента

$\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ наблюдалась высокая интенсивность адсорбции диацетофенонилселенида.

Были проанализированы экспериментальные данные при помощи метода избыточных величин Гиббса и проведена термодинамическая интерпретация. В ходе этого анализа были изучены концентрационные зависимости изменения химического потенциала и свободной энергии Гиббса в системах, которые были исследованы.

Результаты полученных расчетов доказывают, что предлагаемый метод адсорбции на основе ДАФС-25 позволяет увеличить эффективность процесса очистки сточных вод предприятий транспортной отрасли за счет снижения в них содержания селеноорганических соединений до 90%. Использование активируемого угля (биологический сорбент) в качестве адсорбента является экономически выгодным, так как после завершения процесса очистки он легко выводится из сточных вод.

Таким образом, использование активированного угля в качестве сорбента при очистке сточных вод объектов транспортной отрасли от селеносодержащих соединений позволит увеличить эффективность процесса очистки сточных вод и свести к минимуму негативное воздействие транспорта на окружающую среду. 

Литература

1. Дремечева Е.С. Механизм адсорбционной очистки сточных вод от эмульгированных нефтепродуктов // Химическая технология и биотехнология, Казань. - 2022. - С. 74-83.
2. Даллакян, П.Б. Сравнительное изучение адсорбции S- и Se-содержащих органических соединений на графитированной термической саже. / П.Б. Даллакян, А.В. Киселев. - Текст : непосредственный // Журнал физической химии. - 1985, Т. 59, № 5. - С. 1278-1279.
3. Изучение адсорбции сероорганических соединений цеолитами медной формы инфракрасной спектроскопией / А.А. Вольцов, В.И. Лыгин, Н.К. Ляпина, А.Д. Улендеева. - Текст : непосредственный // Журнал физической химии. - 1983. - Т. 57, № 12. - С. 3022-3024.
4. Дмитриенко Т. Г. Исследование адсорбции 1,5-дифенил-3-селенапентадиона-1,5 из различных растворителей / Т.Г. Дмитриенко // Деп. в ВИНТИ 04.12.2006. № 1494 - В 2006. - № 2. - б.о.58. - С.90. - Текст : непосредственный.
5. Дмитриенко, Т.Г. Исследование адсорбции селеносодержащего препарата ДАФС-25 из разбавленных растворов на сорбентах различной химической природы / Т.Г. Дмитриенко, И.С. Родзивилова. - Текст : непосредственный // IV Международная конференция «Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология («Композит 2007»»). - 2007. - Саратов. - С. 95-98.
6. Дмитриенко, Т.Г. Исследование адсорбции 1,5-дифенил-3-селенопентадиона-1,5 с целью создания комбинирования энтеросорбента / Т.Г. Дмитриенко. - Текст : непосредственный // Труды международного симпозиума восточно-азиатских стран по полимерным композиционным материалам и передовым технологиям, СГТУ. - Саратов, 2005. - С. 185 - 188.
7. Ходжаев Ф.К. Термодинамическая активность и свободная энергия Гиббса сплавов систем свинца с некоторыми элементами периодической таблицы // Вестник СГТУ — 2022. - №2 (93). - С. 93-97.

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО СПОСОБА ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ

Рассмотрены современные методы борьбы с угольной пылью, доказана актуальность данной темы. Приводятся аргументы о том, что современные методы борьбы с пылью малоэффективны и необходим новый способ пылеподавления, который сможет комплексно решить данный вопрос. Для решения вопроса пылеподавления предлагается использовать биологический препарат.



В.В. Самойлов

Ключевые слова: уголь, пылеподавление, перевозка, погрузочно-разгрузочные работы, хранение угля, сыпучие грузы

EDN: GJXDLC

На сегодняшний день очень остро на железнодорожном транспорте стоит проблема угольной пыли. Учитывая значительные объемы добычи, огромное значение приобретает проблема, связанная с доставкой требуемых объемов углей на места потребления [1].

Уголь является одним из самых перевозимых видов грузов и занимает около 1/3 от общего числа перевозимых грузов (рис. 1).

Погрузка, перевозка и выгрузка — это три составляющие одного технического процесса [2].

На каждом этапе данного технологического процесса есть свои опасные и вредные факторы, однако необходимо отметить пылевой фактор, который сопровождает технологический процесс на всем этапе его протяженности.

В результате в местах массовой погрузки-разгрузки каменного угля ежегодно выбрасывается в атмосферу в среднем 250 тонн пыли, а запыленность воздуха в районе погрузки-разгрузки угля может во

много раз превышать значения ПДК [3]. Загрузка железнодорожных полувагонов, углем или другими сыпучими грузами, образование пыли происходит в момент когда угольная масса ударяется об внутреннюю часть периметра вагона. По причине удара угольной массы об днище вагона образуется воздушный поток, уносящий мелкую угольную фракцию, образуя таким образом поток пыли, который затем выбрасывается в атмосферу, загрязняет окружающую среду, железнодорожные пути и объекты железнодорожной инфраструктуры. Угольная пыль также представляет опасность вследствие того, что может вызвать самовозгорание угля.

При хранении уголь способен к самонагреванию и самовозгоранию. При этом вначале происходит самонагревание. Затем возможно самовозгорание угля (рис. 2).

При перевозке угля используется ряд мер по пылеподавлению, которые можно разбить на две основные группы:

Самойлов Вадим Вадимович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: охрана труда, специальная оценка по условиям труда, профессиональные заболевания. Автор 10 научных работ.

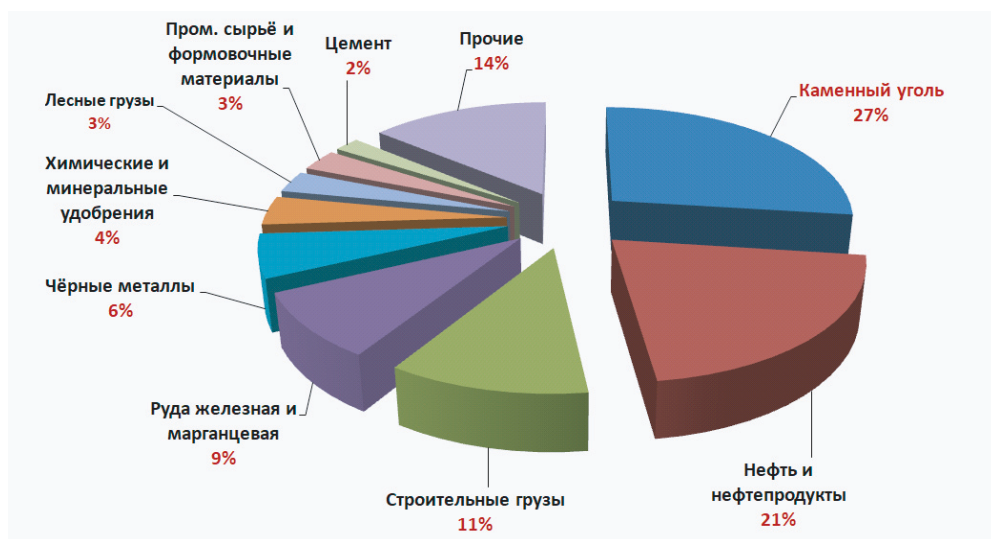


Рис. 1. Структура грузоперевозок

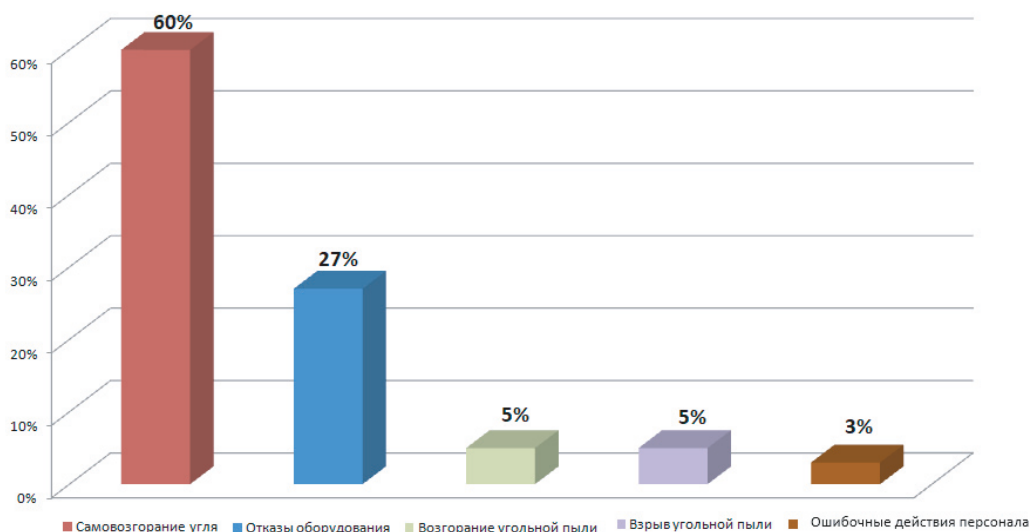


Рис. 2. Основные причины возгорания угля

- водяное орошение угольного пласта перед его погрузкой (связывание тонкодисперсных частиц угля);

- мероприятия по обеспыливанию рабочей зоны за счет воздействия воздушными потоками и систем вентиляции [5].

Однако существует новый метод по борьбе с пылью, основанный на биологическом способе пылеподавления. Препарат, называемый «агломерирующий гидросорбционный эмульгатор» (АГЭ) показывает большую эффективность, чем имеющиеся на железнодорожном транспорте технологии пылеподавления.

Результаты по сдуванию угольной пыли представлены в таблице [7].

Эффективность пылеподавляющего действия АГЭ составила более 85%. Необходимо отметить, что снижение эффективности пылеподавляющего действия АГЭ даже на третьи сутки проведения исследований не установлено. На основе имеющихся данных можно сделать вывод, что биологический способ пылеподавления является наиболее эффективным и может обеспечивать пылеподавление на всем пути следования железнодорожного транспорта.

Таблица

Эффективность пылеподавляющего действия препарата АГЭ

Пылеподавляющее вещество	Время опыта, час	Скорость воздуха, м/с	Расчетная концентрация пыли до нанесения покрытия, мг/м ³	Расчетная концентрация пыли после нанесения покрытия, мг/м ³	Эффективность пылеподавляющего действия, %
Вода	1	20	10,52	3,55	66,25
		25	12,64	3,88	69,28
		30	13,58	3,94	70,94
	24	20	8,84	6,71	24,04
		25	9,10	7,14	21,48
		30	9,83	7,22	26,50
	72	20	8,74	8,66	0,87
		25	9,13	8,74	4,20
		30	9,24	9,09	1,64
АГЭ	1	20	10,52	1,54	85,3
		25	12,64	2,13	83,15
		30	13,58	2,29	83,11
	24	20	8,84	1,15	86,92
		25	9,10	1,24	86,34
		30	9,83	1,37	86,01
	72	20	8,74	1,10	87,42
		25	9,13	1,18	86,98
		30	9,24	1,18	87,21

Литература

- ГОСТ 12.1.005-88 . Система стандартов безопасности труда . Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны = Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29.09.88 № 3388 : дата введения 1989-01-01 / разработан и внесен Министерством здравоохранения СССР, Всесоюзным Центральным Советом Профессиональных Союзов . - Москва : Издательство стандартов, 1988; Стандартинформ, 2008. - 78 с. - Текст : непосредственный.
- ГОСТ 22235-2010 . Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ = Freight cars for 1520 mm gauge main line railways. General requirements for safety in loading-unloading and shunting operations : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 ноября 2010 г. № 420-ст : дата введения 2011-05-01/разработан «Уральским отделением» - филиалом Открытого акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (Уральское отделение ОАО «ВНИИЖТ»); Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт

железнодорожного транспорта” (ОАО «ВНИИЖТ»); Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт вагоностроения» (ОАО «НИИ вагоностроения»). - Москва : Стандартинформ, 2011. - 22 с. - Текст : непосредственный.

3. ГОСТ 32509-2013 Вещества поверхностно-активные. Метод определения биоразлагаемости в водной среде = Surface-active agents. Method for determination of biodegradability rate in aquatic environment : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. № 1849-ст. : дата введения 2015-01-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт бытовой химии «Росса» (ООО «Росса НИИБХ»), Техническим комитетом по стандартизации ТК 354 «Бытовая химия» Москва : Стандартинформ, -2014. - 28 с. - Текст : непосредственный.

4. Самойлов, В.В. Анализ современных технологий пылеподавления при работе с сыпучими грузами. - Текст : непосредственный / В.В. Самойлов, О.С. Сачкова // Проблемы безопасности российского общества. - 2020. - №3. - С. 86-88.

5. Голоскоков, С.И. Метод определения смачивающей способности угольной, углепородной пыли растворами поверхностно-активных веществ / С.И. Голоскоков, Н.М. Недосекина, М.С. Сазонов [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. - 2014. - № 1. - С. 99-102.

6. Коршунов, Г.И. Эффективность применения поверхностно-активных веществ для борьбы с угольной пылью / Г.И. Коршунов, Е.В. Мазаник, А.Х. Ерзин, А.В. Корнев. - Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. - №3. - С. 55-61.

7. Самойлов, В.В. Исследования по оценке эффективности и безопасности биологического препарата для пылеподавления. / В.В. Самойлов, О.С. Сачкова, А.М. Елин. - Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. - 2021. - №2. - С. 101-107.