

В. Я. НЕГРЕЙ, В. М. ОВЧИННИКОВ, С. А. ПОЖИДАЕВ, В. В. СКРЕЖЕНДЕВСКИЙ,  
Н. Г. ШВЕЦ, Е. В. ШКРАБОВ (Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель, Республика Беларусь)

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

У статті розглянуто основні напрямки підвищення ефективності використання палива на залізничному транспорті: оптимізація перевізного процесу, технічні заходи, організація адекватного нормування палива. По кожному напрямку представлений аналіз декількох можливих заходів.

*Ключові слова:* підвищення енергоефективності, залізничний транспорт, світлі нафтопродукти

В статье рассмотрены основные направления повышения эффективности использования топлива на железнодорожном транспорте: оптимизация перевозочного процесса, технические мероприятия, организация адекватного нормирования топлива. По каждому направлению представлен анализ нескольких возможных мероприятий.

*Ключевые слова:* повышение энергоэффективности, железнодорожный транспорт, светлые нефтепродукты

In the article the main directions of increasing the efficiency of fuel use on the railway transport are considered: optimization of transportation process, technical measures, organization of adequate fuel rating. The analysis of several possible measures in each direction is provided.

*Key words:* power efficiency increase, railway transport, light oil products

В условиях удорожания углеводородного топлива вопросы экономного их расходования, сокращения непроизводительных потерь приобретают первостепенное значение. Белорусская железная дорога является крупнейшим потребителем энергоресурсов, в частности светлых нефтепродуктов (дизельного топлива), в стране. Основная доля расхода топливно-энергетических ресурсов приходится на тягу поездов (свыше 200 тыс. т в год).

Можно выделить три основных направления повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов:

- оптимизация перевозочного процесса на железнодорожном транспорте, внедрение интеллектуальных технологий в практику эксплуатационной работы;
- совершенствование системы нормирования расхода топлива;
- разработка и внедрение технических мероприятий, направленных на совершенствование подвижного состава и его взаимодействие с путевой инфраструктурой.

Рассмотрим вышеприведенные направления улучшения энергоэффективности железнодорожного транспорта.

### 1. Оптимизация перевозочного процесса

К направлению интеллектуализации перевозочного процесса с целью энергосбережения

можно отнести: оптимизацию скоростей движения поездов; оптимизацию маневровой работы на станциях; повышение массы поездов и др.

Оптимизация скорости движения поездов различных категорий на участках дороги, при которой достигается наиболее эффективное использование светлых нефтепродуктов и имеет место быть максимальный синергетический эффект, является одной из важных задач по переходу к интеллектуальным транспортным системам (ИТС) и, в частности, к интеллектуальным системам управления. Эффектом от оптимизации технической скорости движения грузовых и пассажирских поездов является сокращение энергетических расходов на тягу в размере 4–12 %, снижение износа подвижного состава и верхнего строения пути на 3–7 %. В целом, с учетом эффектов в других системах, расходы сократятся на 8–14 %, [1]. Проблема оптимизации скорости ставит на повестку дня вопрос о ранжировании железнодорожных направлений в зависимости от этого важнейшего показателя. Следует отметить, что в рамках этого направления эффективным является повышение массы поездов. Повышение массы на поезда на 1 % при оптимальной технической скорости движения сокращает удельный расход топлива на 0,3 %.

Создание ИТС требует развития теории тяговых расчетов. Назрела острая необходимость перехода к вероятностной концепции расчета

основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов, что позволит повысить точность расчета массы составов и скорости движения поездов, снизить расход топливно-энергетических ресурсов на единицу перевозочной работы. Разработка новой концепции тяговых расчетов, исследование новых закономерностей движения позволят иметь научно-обоснованные алгоритмы управления тягой, учитывающие вероятностный характер параметров состава каждого поезда, его аэродинамические характеристики, состояние тягового подвижного состава, постоянные и временные предупреждения, влияние внешней среды и другое. Отличительная особенность этой теории от ранее выполненных – это учет вероятностно-статистических закономерностей тяги поездов. В первую очередь, исследование вероятностных характеристик распределения колебаний основного удельного сопротивления, выделение аэродинамической составляющей сопротивления, учет метеорологических условий и других параметров. Исключительное значение имеет исследование структуры транспортных потоков и ее влияния на режимы движения. Интеллектуальная система управления должна вырабатывать решения, которые будут оптимальными в каждом конкретном случае.

Таким примером является, например, **учет влияния аэродинамики** поезда на расход топлива на тягу поездов и формирование «гладких» поездов. Анализ результатов исследований позволяет отметить, что наиболее сильное влияние на размеры экономии топлива оказывает возможное сочетание подвижного состава. Максимальный размер экономии достигается для сочетания «крытый вагон – платформа» при реформировании сочетания «платформа – крытый вагон» (сокращается лобовое сопротивление). Например, при расстоянии перевозки 300 км, встречном ветре 5 м/с и результирующим углом между направлением ветра и направлением движения поезда  $\alpha = 20^\circ$ , который также имеет существенное значение, экономия топлива на тягу поезда составит 65–70 кг, [1].

**Реализация математических моделей и методов с помощью программных средств позволяет имитировать с достигаемой высокой степенью приближения реальные процессы, происходящие на станциях.** К наиболее важным таким процессам и работам относятся маневровые операции с пассажирскими и грузовыми поездами или группами вагонов, [2]. Известно, что на маневровую работу на станциях затрачивается около 20 % всего дизельно-

го топлива, потребляемого железнодорожным транспортом на перевозку пассажиров и грузов.

Моделирование маневровых передвижений на станциях выполняется на основе тяговых расчетов, в частности, численного решения дифференциального уравнения движения поезда (маневрового состава). С использованием тяговой характеристики устанавливается режим движения локомотива и в зависимости от него – расход топлива.

Выполненные исследования показали обоснованность использования полученных математических моделей, разработанных для различных условий, которые позволяют раскрыть внутренние закономерности реализации маневровых процессов и взаимосвязи между длиной полурейсов, планом и профилем пути перемещения, типом локомотива, массой маневрового состава и расходом топлива. Широкое применение математических моделей маневровых процессов в исследованиях позволяет решать следующие научно-практические задачи:

- оптимизация параметров конструкции продольного профиля железнодорожных станций, их элементов и устройств по энергетическому критерию;

- совершенствование конструкций горловин станционных парков и структуры внутростанционных соединений, оценка их влияния на энергетические затраты при выполнении технологических операций на станциях;

- определение рациональных маршрутов приема и отправления поездов, их перестановок, расформирования и ранжирования станционных путей по уровню энергетических затрат на передвижения различных составов поездов с учетом протяженности маршрутов, особенностей конструкции горловин и т.п.;

- рационализация выбора типа маневровых локомотивов в зависимости от характеристик маневровых средств, вида маневровой работы и конкретных местных условий (особенности путевого развития, структуры и облика станций, конструкций станционных подсистем, горловин, их взаимное расположение, масса перерабатываемых составов, параметры вагонопотока, длина полурейсов и др.);

- установление математических зависимостей и выявление закономерностей влияния различных факторов (как в целом, так и в отдельности каждого) на энергетические затраты, энергоэффективность перевозочного процесса, а также их коррелированности, эластичности и вида связей.

Так, установлено, что расход топлива маневровыми локомотивами при увеличении количества стрелочных переводов и кривых участков путей на маршруте передвижения в горловинах станций сложных конструкций (более 6 переводов) возрастает нелинейно, с увеличением массы составов эластичность связи факторов увеличивается, что не так благотворно сказывается на показателях работы станций. В то же время расчеты показывают, что максимальный эффект достигается при формировании на станциях наиболее тяжелых составов (учитывая ограничения по силе тяги локомотива, сцеплению и полезной длине приемоотправочных путей), однако только при одновременном спрямлении и сокращении длины маршрутов передвижения таких поездов на станциях. В этом случае целесообразно также объединять короткие составы перед надвигом и их расформированием. Данные рекомендации справедливы при использовании мощных маневровых локомотивов. Полученные выводы важны как для проектировщиков и инженерно-технического персонала дорог, так и для оперативных работников. В реальных условиях работы станций обосновано определяются энергоэффективные маршруты приема и отправления поездов в зависимости от их массы и длины. За счет ранжирования станционных путей по энергетическому критерию для выполнения тех или иных технологических операций с поездами и вагонами может быть достигнута экономия топлива от 1 до 6 кг только на одну такую операцию при имеющейся вариантности задания маршрутов движения. Чем крупнее станция, тем больший эффект можно ожидать.

В решении этих вопросов скрыты значительные резервы экономии топлива на железнодорожных станциях, которая может быть достигнута без существенных затрат на разработку и внедрение энергосберегающих мероприятий, а только за счет рациональной организации эксплуатационной работы и устранения непродуктивных ее методов.

Интеллектуализация перевозочного процесса открывает большие возможности для сокращения расхода топлива на формирование поездов (оптимальный план формирования, интеллектуальный график движения поездов), на перемещение поездов, благодаря оптимизации параметров системы «путь-экипаж». Исследования показали, что энергоэффективным является состояние системы «путь-экипаж», при котором интенсивность износа бандажа колесных пар локомотива составляет 0,32 мм на  $10^4$  ткм брутто.

Отклонение от этой величины приводит к существенному росту удельного расхода топлива.

## 2. Нормирование расхода топлива

Важным направлением снижения удельного расхода топлива является совершенствование действующей системы его нормирования. Данное организационное мероприятие осуществляется по трем основным направлениям: нормирование удельного расхода топлива на тягу поездов; нормирование удельного расхода топлива на самоходный специальный подвижной состав (ССПС); применение аппаратно-программных комплексов учета расхода топлива и режимов работы подвижного состава.

**Тяга поездов.** Одним из путей снижения расхода энергоресурсов на тягу поездов является совершенствование системы нормирования, что обеспечивает возможность объективной оценки работы локомотивной бригады и тепло-технического состояния локомотива, а, следовательно, позволяет принимать эффективные решения по экономии энергоресурсов. При этом оценивается выполнение норм расхода дизельного топлива и электрической энергии на поездку. От обоснованности задаваемых на поездку норм во многом зависит эффективность решений по экономии энергоресурсов и, как следствие, рациональность использования дизельного топлива и электрической энергии в тяге поездов.

Существующая система нормирования нуждается в совершенствовании, прежде всего, по причине ее высокой субъективности. В настоящее время распространение вычислительной техники и автоматизация процесса нормирования дает возможность применения для расчета норм методов, использовавшихся ранее не в полной мере. С приемлемой точностью прогнозировать расход дизельного топлива и электрической энергии за поездку позволяют методы математической статистики, [3].

В УО «БелГУТ» ведутся работы по построению регрессионных моделей расхода энергоресурсов на тягу поездов. В общем случае на расход энергоресурсов влияют следующие эксплуатационные факторы: приведенный уклон участка следования поезда, перевозочная работа, масса состава брутто, пробег, техническая и участковая скорости движения поезда, количество остановок поезда на промежуточных станциях, продолжительность нагона, температура наружного воздуха, скорость попутного и бокового ветра, [4].

Установлено, что из числа рассмотренных эксплуатационных факторов наиболее сильное влияние на расход энергоресурсов за поездку оказывает перевозочная работа. Достаточно сильное влияние на расход энергоресурсов за поездку оказывает также величина пробега.

При построении регрессионной модели расхода энергоресурсов за поездку необходимо также определить величины прогнозного и накопительного периодов данной модели.

Использование многофакторных регрессионных моделей расхода энергоресурсов в пассажирском движении позволяет снизить субъективность процесса нормирования, повысить его качество и тем самым стимулировать рациональное использование топливно-энергетических ресурсов в тяге поездов, [5].

**Самоходный специальный подвижной состав.** На основании опыта, накопленного в УО «БелГУТ», разработана специализированная методика и инструкция о порядке разработки и применения норм расхода топлива для специального железнодорожного подвижного состава.

Решено отказаться от принципа, применяющегося для автомобильной техники, в соответствии с которым при нормировании для транспортного средства определяется основная (базовая) норма и в дальнейшем в зависимости от условий эксплуатации она корректируется соответствующими поправочными коэффициентами, количество которых достигает 30. Использование такого количества коэффициентов приводит к значительному усложнению порядка учета использования топлива линейными предприятиями. Кроме того, комбинированное использование данных поправок в условиях предприятия позволяет ему самостоятельно корректировать имеющуюся норму в пределах от +50 до -15 %, что ставит под сомнение эффективность использования разработанных норм, [6].

Предлагается использовать принцип разработки норм расхода топлива для конкретных условий эксплуатации каждой единицы специального железнодорожного подвижного состава в условиях предприятия-владельца. При этом значительно упрощается расчет и в норму заранее закладываются имеющиеся особенности.

**Аппаратно-программные комплексы.** Локомотивный парк оснащается аппаратно-программными комплексами учета и регистрации параметров работы, что позволяет обеспечить экономию дизельного топлива до 5 %. В настоящее время на предприятиях и в подразделениях Белорусской железной дороги внедряются навигационно-информационные технологии и

на их базе – специализированные геоинформационные системы мониторинга и учета работы подвижного состава рельсового транспорта. Разработка и использование навигационно-информационных технологий в Республике Беларусь признано приоритетным направлением.

### 3. Технические мероприятия

К указанным мероприятиям можно отнести: улучшение взаимодействия в системе «колесо-рельс» (лубликация, шлифование рельсов, обточка бандажей колесных пар, сокращение количества стыков рельс и др.) и совершенствование тягового подвижного состава.

**Лубликация.** Теоретическое обоснование и зарубежный опыт говорят о том, что применение лубликации (рельсосмазывание) позволяет экономить до 5–7 % топливно-энергетических ресурсов на тягу, а по оценке ВНИИЖТа, сплошное рельсосмазывание на равнинном профиле дает до 30 % экономии. Если учесть, что затраты на электроэнергию и топливо для тяги поездов составляют порядка 21 % от общих расходов дороги, то экономия очевидна. Исследования, выполненные на примере направления Гомель–Минск, показали экономическую эффективность применения лубликации, [1], однако исследование по выбору оптимальной системы лубликации следует продолжить.

**Рельсошлифование** – наиболее распространенный на железных дорогах способ поддержания рельсов в работоспособном состоянии. Оно позволяет своевременно устранять искажения профиля, волнообразный износ и внутренние дефекты, а также улучшить вписывание подвижного состава в путь. В сочетании с надлежащей лубликацией шлифование может продлить срок службы рельсов на 50–300 %, а основное удельное сопротивление движению сократить на 12–17 %, что является залогом резкого сокращения расхода топлива на тягу поездов, выполнение ремонтных работ, [1].

**Новые конструкции верхнего строения пути** обеспечивают сокращение количества стыков и увеличение длины «гладкого» пути до 24–27 км. Такие конструкции позволяют сократить потребление топлива на тягу поездов на 5–12 %.

**Совершенствование тягового подвижного состава** осуществляется путем приобретения современного энергоэффективного тягового подвижного состава и глубокой модернизацией эксплуатируемого парка.

Интеллектуальный локомотив способствует развитию практики адаптивных технологий на

железнодорожном транспорте (оптимальная траектория движения, оптимальная масса и скорость, другие параметры).

Снижению расхода светлых нефтепродуктов способствует планомерная работа Белорусской железной дороги по расширению использования электрической тяги. Закупается современный электроподвижной состав: электропоезда ЭП<sup>ГР</sup>, магистральные грузовые электровозы БКГ-1.

Магистральный двухсекционный электровоз БКГ-1 мощностью 9660 кВт и максимальной скоростью 120 км/ч способен выполнять перевозки составов массой более 7500 т, на маршруте Смоленск–Минск–Брест. Данная масса состава на 36 % больше, чем масса состава, перевозку, которого может обеспечить электровоз ВЛ80. Благодаря применению современных систем управления, асинхронных тяговых электродвигателей, увеличенному сроку межремонтных пробегов эксплуатационные затраты на электровоз снижаются на 20 %.

Для работы на малоделятельных направлениях внедряется так называемый «рельсовый автобус» или одновагонный дизель-поезд ДП-1 совместного производства ОАО «Управляющая компания холдинга "БЕЛКОММУНМАШ" и польской холдинговой компании "PESA Bydgoszcz SA"». Для привода одновагонного рельсового автобуса применен двигатель фирмы «МАН» и гидравлическая передача фирмы «Фойт». Мощность силовой установки составляет 382 кВт. Эксплуатационная скорость 120 км/ч, общее количество мест 171. Новый рельсовый автобус значительно экономичнее своих рижских предшественников серии ДР-1, расход топлива ДПП на один километр пробега в три раза меньше. Дальность хода на одной заправке топлива составляет порядка 1000 км.

К 2014 году на Белорусской железной дороге будет завершён процесс модернизации грузовых магистральных тепловозов современным четырёхтактным энергоэффективным дизелем Д49. При модернизации силовой установки на тепло-

При этом для выполнения маневровой работы, в настоящее время, используются мощные маневровые локомотивы. Однако известно, что использование мощных тепловозов на частичных режимах ведёт к значительному перерасходу дизельного топлива.

Проведенные исследования различных видов маневровой работы свидетельствуют о том, что величина маневрирующих составов, за исключением расформировываемых на сортировочных горках, изменяется в пределах от одно-

воз устанавливаются современные микропроцессорные системы автоматического управления, регулирования и защиты. Применение вышеназванных систем позволяет улучшить экономические характеристики тепловозов и способствует повышению безопасности движения.

Так, в Беларуси на базе локомотивного предприятия «Лида» совместно с чешской компанией «CZ LOKO a.s.» в результате глубокой модернизации на базе тепловоза ЧМЭЗ созданы отечественные высокотехнологичные маневровые локомотивы ТМЭ-1 (1455 кВт) и ТМЭ-2 (970 кВт). Всего в 2011–2014 гг. планируется построить 49 маневровых тепловозов серий ТМЭ-1 и ТМЭ-2. Тепловоз ТМЭ-1 разработан для тяжелой маневровой работы, а ТМЭ-2 – для более легкой. Для станций с малым объемом маневровой работы, подъездных путей предприятий и организаций проектируются двухосные тепловозы малой мощности ТМЭ-3. Для этих же целей могут использоваться и локомотивы, т.е. тяговый подвижной состав с комбинированным, автомобильно-рельсовым ходом.

Выполняемые в настоящее время БелГУТом исследования показали, что практически все маневровые передвижения на станциях осуществляются полурейсами, при этом более 40 % маневровой работы приходится на простой с работающим двигателем, а 10–15 % времени приходится на холостые передвижения. Распределение режимов работы маневрового локомотива представлено на рис. 1.

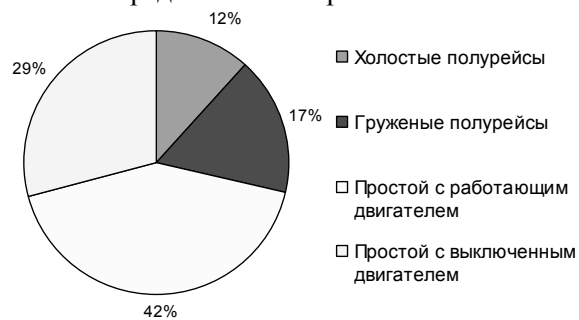


Рис. 1. Распределение режимов работы маневрового локомотива по продолжительности

го до нескольких вагонов, а скорость движения при маневровой работе не превышает 25 км/ч.

Поскольку в настоящее время критерий времени не стал лимитирующим в маневровой работе, то в условиях экономии энергоресурсов на первый план выходит уменьшение расхода топлива маневровыми локомотивами. Поэтому технология маневровой работы должна отвечать современным требованиям, как по производительности, так и по энергоёмкости.

Сократить потребление дизельного топлива

в маневровой работе можно за счет замены мощных маневровых тепловозов, работающих на частичных режимах, на тепловозы меньшей мощности либо на тепловозы с гибридной силовой установкой. В настоящее время проводятся исследования маневровой работы с целью обоснования основных технических характеристик маневровых тепловозов для Белорусской железной дороги. Одним из критериев оптимизации является обеспечение эффективного использования дизельного топлива.

Другой областью применения гибридных силовых установок является пригородное движение. Для пригородного движения характерны частые остановки и разгоны, расстояние между остановочными пунктами составляет 2...5 км, что упрощает задачу накопления энергии, выделившейся при торможении, так как не требуется ее длительного хранения.

Для исследования резерва экономии топливно-энергетических ресурсов в пригородном движении нами была разработана математическая модель, основанная на методике тяговых расчетов, [7-8].

На первом этапе моделирования рассчитан расход топлива на виртуальную поездку по участку Гомель-Добруш, который сравнили с результатом измерения топлива при реальной поездке. При расчете расхода топлива учтена зависимость удельного расхода от мощности дизеля, КПД гидропередачи и мощность, необходимая на привод вспомогательного оборудования дизель-поезда. По расчету расход топлива составил 41,0 кг, а измеренный во время поездки по участку Гомель-Добруш – 39,8 кг, таким образом, погрешность не превышает 3 %. На этом основании сделаны выводы об адекватности полученной модели, и о том, что данная модель пригодна для дальнейших исследований потенциала экономии топлива при реализации рекуперативного торможения.

На втором этапе моделирования установлено, что для рассматриваемой поездки потенциал экономии дизельного топлива при реализации рекуперативного торможения составляет 8,9 кг или 21,7 %. Исследование влияния максимальной скорости движения и расстояния между остановочными пунктами показало, что при увеличении на 15 % максимальной скорости движения эффект от рекуперативного торможения доходит до 25...28 %. Уменьшение расстояния между остановочными пунктами в два раза увеличивает эффект (до 30...35 %).

В связи с развитием отечественного вагоностроения важно установить оптимальные (по

критериям энергоэффективности) параметры подвижного состава. В первую очередь это относится к выбору такого системного параметра, как осевая нагрузка. Исследования в этой области затрагивают целый ряд комплексных проблем и их решение рассматривается в БелГУТе и Белорусской железной дороге.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергетическая стратегия Белорусской железной дороги до 2020 года. Ч. I [Текст]: отчет о НИР в 2-ух ч.: 5255 / Белорус. гос. ун-т трансп.; рук. В. Я. Негрей; исполн. В. М. Овчинников. [и др.]. – Гомель, 2009. – 504 с. – Библиогр.: С. 504. – № ГР 2008305.
2. Пути снижения расхода топлива в маневровой работе на железнодорожных станциях [Текст] / В. М. Овчинников и др. // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2010. – № 2 (21). – С. 151-158.
3. Повышение качества нормирования расхода энергоресурсов магистральными локомотивами [Текст] / С. Я. Френкель и др. // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2007. – № 1-2. – С. 137-140.
4. Френкель, С. Я. Эксплуатационные факторы, влияющие на расход энергоресурсов за поездку в пассажирском движении [Текст] / С. Я. Френкель, А. П. Дединкин // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: материалы II Международ. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В. И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2008. – С. 187.
5. Френкель, С. Я. Многофакторная модель расхода энергоресурсов в пассажирском движении [Текст] / С. Я. Френкель, А. П. Дединкин, Р. К. Гизатуллин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2011. – № 1 (22). – С. 103-106.
6. Самодум, Ю. Г. Разработка норм расхода топлива для специального железнодорожного подвижного состава [Текст] / Ю. Г. Самодум, А. А. Железняков, А. П. Дединкин // Проблемы безопасности на транспорте: материалы V Международ. науч.-практ. конф. – Гомель: БелГУТ, 2010. – С. 285-286.
7. Френкель, С. Я. Техника тяговых расчетов [Текст]: учеб.-метод. пособие / С. Я. Френкель. – Гомель: БелГУТ, 2009. – 73 с.
8. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

Поступила в редколлегию 03.08.2012.

Принята к печати 05.08.2012.