Грузовик

8
2018

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель ООО "Научно-техническое издательство "Инновационное машиностроение"
Главный редактор С.Н. ПЕДЕНКО

Редакционный совет

Д.Х. Валеев, д-р техн.наук
В.А. Волчков
С.М. Гайдар, д-р техн.наук
Л.В. Грехов, д-р техн.наук, проф.
В.А. Зорин, д-р техн.наук
В.В. Комаров, канд.техн.наук
В.А. Марков, д-р техн.наук, проф.
А.Н. Ременцов, д-р пед.наук, канд.техн.наук
О.Н. Румянцева, ген.дир.ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
А.Ф. Синельников, канд.техн.наук, проф.
А.А. Солнцев, д-р техн.наук
В.С. Устименко, канд.техн.наук
Х.А. Фасхиев, д-р техн.наук, проф.
Н.Д. Чайнов, д-р техн.наук, проф.

Корпункт:
Я.Е.Карповский (г.Минск)

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., дом 2-а, стр.12
Тел.(499) 269-48-96
E-mail: gruzovik@mashin.ru; http://www.mashin.ru

Адрес издательства
107076, Москва, Колодезный пер., дом 2-а, стр.2
Тел.(495) 661-03-36

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Регистрационный номер ПИ № ФС77-63955 от 09.12.2015 г.

Подписной индекс:
по объединенному каталогу
"Пресса России" 39799

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», "Грузовик", 2018

Перепечатка материалов из журнала «Грузовик» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Грузовик» обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

В НОМЕРЕ:

Исследования. Расчет

3 *Путинцев С. В., Бикташев А. Ф.* Расчетная программа CRJet для моделирования процесса струйного маслоснабжения цилиндропоршневой группы

7 *Барыкин А. Ю., Лянденбурский В. В., Тахавиев Р. Х.* Эффективность работы узлов трансмиссии грузового автомобиля в условиях холодного климата

Городской пассажирский наземный транспорт

11 *Максимов В. А., Завгородний А. А., Максимов П. В., Назаров А. А., Поживилов Н. В.* Методический подход к определению удельной трудоемкости текущего ремонта автобусов ЛиАЗ-529221 и ЛиАЗ-621321 в эксплуатации

Энергетическое машиностроение

15 *Козловский В. Н., Заятров А. В., Васильев М. М., Полякова Е. В.* Этапы, проблемы и перспективы развития производственных проектов электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой

17 *Воробьев Ю. В., Дунаев А. В.* Активация моторных топлив

24 *Щицын В. Ю., Пыдрин А. В., Лагузин А. Б., Волков А. А.* Восстановление свойств отработавших моторных масел применением полифункциональных присадок

Транспортный комплекс

26 *Марков В. А., Барченко Ф. Б., Поздняков Е. Ф., Епишин А. Ю., Плахов С. В.* Исследование системы автоматического регулирования дизель-генераторной установки. Часть 3

Практика

35 *Якубович А. Н., Якубович И. А.* Моделирование состояния автодорожной сети Северных регионов России в условиях прогнозируемых климатических изменений

40 *Доленко Д. В.* Методы сетевого планирования

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней http://perechen.vak2.ed.gov.ru/
Система Российского индекса научного цитирования www.elibrary.ru. Двухлетний импакт-фактор РИНЦ 2016 г. — 0,296. Место в рейтинге SCIENCE INDEX за 2016 г. по тематике "Транспорт" — 30; по тематике "Машиностроение" — 58.

Информация на сайте "Autotransportnik.ru"

Truck

8
2018

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND INDUSTRIAL MAGAZINE

Founder JSC Scientific and Technical Publishing House "Innovative Engineering"
Editor-in-Chief S.N. PEDENKO

Editorial council

D.Kh. Valeev, dr.en.s.
V.A. Volchkov
S.M. Gaydar, dr.en.s., prof,
L.V. Grekhov, dr.en.s., prof.
V.A. Zorin, dr.en.s.
V.V. Komarov, PhD in en.s.
V.A. Markov, dr.en.s., prof.
A.N. Rementsov, dr.Hab, PhD in en.s.
O.N. Rumyantseva, General Director, JSC "Publisher "Innovative Engineering"
A.F. Sinel'nikov, PhD in en.s., prof.
A.A. Solntsev, dr.en.s.
V.S. Ustimenko, PhD in en.s.
Kh.A. Faskhiev, dr.en.s., prof.
N.D. Chaynov, dr.en.s., prof.

Correspondent's office:
Ya.E. Karpovsky (Minsk)

Address of the editorial office:
107076, Moscow, Kolodezny Lane, house 2-a, str. 12
Ph. (499) 269-48-96
E-mail: gruzovik@mashin.ru; snp748@yandex.ru
http://www.mashin.ru

Address of publishing house
107076, Kolodezny Lane, house 2-a, str. 2
Ph. (495) 661-03-36

The magazine is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor).
Registration number PI number FS77.-63955 on December 9, 2015

Subscription index:
according to the integrated catalog "Press of Russia" 39799

JSC Innovatsionnoye mashinostroyeniye Publishing House, "Truck", 2018

The reprint of materials from the "Truck" magazine is possible at obligatory written coordination with editorial office of the magazine. At the link to the "Truck" magazine is obligatory for a reprint of materials.

For contents of advertizing materials responsibility is born by the advertiser.

CONTENTS:

Research. Calculation

3 *Putintsev S. V., Biktashev A. F.* Computer program CRJet for modeling cylinder and piston assembly oil jet supply process

7 *Barykin A. Yu., Ljandenbursky V. V., Takhaviev R. Kh.* The efficiency of the transmission units of the truck in cold climate conditions

Public passenger land transport

11 *Maksimov V. A., Zavgorodney A. A., Maksimov P. V., Nazarov A. A., Pozhivilov N. V.* Methodical approach to determination of specific labor intensity of the current repair of buses LiAZ-529221 and LiAZ-621321 in the conditions of the motor company

Energy engineering

15 *Kozlovskiy V. N., Zajatrov A. V., Vasiliev M. M., Polyakova E. V.* Stages, problems and prospects for the development of industrial projects for electric vehicles and hybrids

17 *Vorobiev Yu. V., Dunayev A. V.* Activation of motor fuels

24 *Shchicyn V. Yu., Pydrin A. V., Laguzin A. B., Volkov A. A.* Restoration of the properties of used motor oils by the use of polyfunctional additives

Transportation complex

26 *Markov V. A., Barchenko F. B., Pozdnjakov E. F., Epishin A. U., Plakhov S. V.* Research of automatic control system of diesel-generator set. Part 3

Practice

35 *Yakubovich A. N., Yakubovich I. A.* Modeling the state of the road network in Northern regions of Russia in the conditions of predictable climate change

40 *Dolenko D. V.* Methods of network planning

The journal is included in the list approved by the WAC RF publishers for publications of papers candidates degrees http://perechen.vak2.ed.gov.ru/
System of Russian Science Citation Index www.elibrary.ru.
The system of the Russian index of scientific quoting www.elibrary.ru.
The two-year impact factor INDEX 2016 — 0.296. Place in the rating of SCIENCE INDEX for 2016 on the subject "Transport" — 30; on the subject "Mechanical Engineering" — 58.
http://elibrary.ru/title_about.asp?id=9777
Information on the site "Autotransportnik.ru"

УДК 621.43

С. В. Путинцев, д-р техн. наук, **А. Ф. Бикташев,** магистр, МГТУ им. Н. Э. Баумана
E-mail: putintsev50@yandex.ru

РАСЧЕТНАЯ ПРОГРАММА CRJET ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО МАСЛОСНАБЖЕНИЯ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ

Приведено обоснование разработки расчетной программы для моделирования (визуализации) процесса подачи струи масла из отверстия в кривошипной головке шатуна. Описаны расчетная схема, допущения, основные выражения и уравнения математической модели. Приведены и обсуждены некоторые результаты моделирования процесса струеобразования, использованные при доводке работы системы смазки универсального быстроходного дизеля 1Ч 8,5/8,0 (ТМЗ-450Д).

Ключевые слова: *масло моторное, маслоснабжение, моделирование, поршень, поршневой двигатель, расчетная программа, струя, струеобразование, шатун, цилиндр.*

The substantiation of working out of the computer program for modeling (visualization) due to connecting rod big end hole motor oil jet supply is resulted. The analytical model, assumptions, basic expressions and equations are described. Some results concerning oil jet formation process used during of the universal high-speed diesel 1CH 8,5/8,0 (TMZ-450D) lubricating system development are presented and discussed.

Keywords: *motor oil, oil supply, modeling, piston, piston engine, computer program, jet, jet formation, connecting rod, cylinder.*

(Рисунки на 2—4-й полосах обложки)

Введение

В ранее опубликованной работе [1] обоснована актуальность изучения как на экспериментальном, так и на расчетно-аналитическом уровнях процессов маслоснабжения деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) четырехтактных поршневых двигателей с традиционным кривошипно-шатунным механизмом (КШМ).

Для экспериментального исследования процессов формирования струй моторного масла, вытекающих из зазоров подшипников коленчатого вала и маслоподающих отверстий шатуна для снабжения смазочным материалом трущихся сопряжений ЦПГ, при непосредственном участии авторов была спроектирована, изготовлена и применена в ходе выполнения НИОКР макетная установка на базе одноцилиндрового малоразмерного дизеля с воздушным охлаждением [2, 3]. Особенность этой установки заключается в автономном (не зависящем от коленчатого вала) электроприводе шестеренчатого масляного насоса, а также в использовании полупрозрачного поршня в полностью прозрачном цилиндре, выполненных соответственно из АБС-пластика и минерального стекла. Эти особенности позволяли наблюдать и осуществлять в режиме реального времени фото- и видеорегистрацию процессов струйного маслоснабжения всех сопряжений ЦПГ как в квазистатическом (без вращения или при ручном проворачивании коленчатого вала), так и в динамическом (при прокрутке коленчатого вала от электродвигателя) режимах испытаний.

В ходе пробных опытов на макетной установке в условиях прокрутки коленчатого вала (без сжатия и сгорания в цилиндре) выяснилось, что недостаточная ударная прочность (хрупкость) тонкостенного стеклянного цилиндра ограничивает динамический режим испытаний двигателя — объекта исследования 1Ч 8,5/8,0 (ТМЗ-450Д), развивающего в зависимости от варианта конструкционного исполнения 3000 мин$^{-1}$ и 3600 мин$^{-1}$, значением частоты вращения не более 600 мин$^{-1}$. Указанное ограничение частоты вращения коленчатого вала макетной установки, а также выявленное при испытаниях в динамическом режиме несовершенство примененных способов регистрации быстротекущих процессов (ускоренная видеосъемка и стробоскопирование) потребовало дополнения макетного моделирования струйного маслоснабжения моделированием расчетным.

Анализ описаний программных продуктов, предназначенных для моделирования работы смазываемых сопряжений поршневых двигателей и систем смазки, в частности, представленных в источниках [4—6], привел к выводу о том, что адаптация этих известных лицензионных пакетов программ к решению частной задачи визуализации струйного маслоснабжения деталей ЦПГ на инженерном уровне окажется более трудоемкой и при этом менее эффективной по результатам, чем применение оригинальной программы, строго ориентированной на конкретный объект исследования, особенности его конструкции и условий работы.

Цель, задачи и объект исследования

Цель исследования состояла в создании простой и надежной программы расчета, позволяющей визуализировать процесс "жизненного цикла" струи масла, вытекающей из маслоподающего отверстия в кривошипной головке шатуна как в квазистатическом, так и в динамическом режимах работы КШМ, без какого-либо ограничения по частоте вращения коленчатого вала.

Основная задача разработки расчетной программы, названной CRJet (от сокращения определяющего словосочетания Connecting Rod Jet — формируемая шатуном струя), состояла в обеспечении контроля временны́х границ (фазы) процесса струйной подачи масла из отверстия кривошипной головки шатуна, а также визуализации формы и траектории струи в функции угла поворота коленчатого вала (ПКВ) с учетом влияющих на процесс струеобразования параметров режима работы, свойств моторного масла и определяющих особенностей конструкции деталей ЦПГ и КШМ. Дополнительные задачи, решаемые программой, определялись техническими требованиями, предъявляемыми к модернизируемой конструкции смазываемого сопряжения.

Объект исследования, предназначенный как для отладки программы CRJet, так и для последующего тестирования с ее помощью условий струйного маслоснабжения деталей ЦПГ, был представлен серийным вариантом конструкции шатуна и коленчатого вала дизеля 1Ч 8,5/8,0 (рис. 1). В показанной на рис. 1 конструкции подача струи масла из кривошипной головки шатуна происходит в период совпадения (перекрытия) маслоподающего отверстия *1* на поверхности шатунного вкладыша с маслоподводящим отверстием *2* на поверхности шатунной шейки коленчатого вала.

Расчетная программа CRJet: краткое описание

Расчетная программа была разработана в интегрированной среде Visual Studio версии 2010 компании Microsoft, что позволило создать графический интерфейс с поддержкой технологии Windows Forms для всех платформ, поддерживаемых Windows. Языком программирования был выбран объектно-ориентированный язык C#.

Расчетная модель (рис. 2) опиралась на схему традиционного КШМ при виде со стороны маховика (авторы выражают благодарность Н. Д. Петрищеву, МГТУ им. Н. Э. Баумана, принявшему активное участие в разработке расчетной схемы и математического обеспечения программы CRJet). Струя моторного масла представлена набором математических точек (МТ), при этом каждая точка в наборе рассматривалась как элементарная порция масляной струи в форме цилиндра, диаметр и длина которого были равны между собой и соответствовали диаметру маслоподающего отверстия d в кривошипной головке шатуна (рис. 3).

Для описания траектории порции масла были определены составляющие вектора скорости МТ с учетом инерционных сил, сопротивления воздушной среды, плотности моторного масла, а также размеров и координат маслоподающего отверстия на шатуне и маслоподводящего отверстия на шатунной шейке коленчатого вала.

Вектор скорости МТ υ рассчитывали путем сложения трех составляющих:

$$\upsilon = \upsilon_p + \upsilon_\tau + \upsilon_c,$$

где υ_p — составляющая скорости МТ, обусловленная давлением масла p, создаваемым масляным насосом, и совпадающая с осью маслоподающего отверстия в шатуне; υ_τ — составляющая линейной скорости МТ, касательная к траектории вращения кривошипа; υ_c — составляющая скорости МТ, являющаяся результатом действия центробежной силы инерции и направленная, соответственно, параллельно оси кривошипа (рис. 4).

Для вывода формулы скорости υ_p была использована известная модель шприца и составлено соответствующее этой модели уравнение Бернулли, решение которого позволило выразить искомую скорость через давление p и плотность ρ моторного масла:

$$\upsilon_p = \sqrt{\frac{2}{\rho}}p.$$

Составляющая линейной скорости υ_τ определялась известным выражением

$$\upsilon_\tau = \omega\varepsilon,$$

где ω — угловая скорость вращения кривошипа коленчатого вала; ε — приведенный радиус вращения.

Для вывода формулы скорости истечения струи, вызванной действием центробежной силы инерции υ_c, было принято допущение о том, что изменение расстояния между осями масляных отверстий в шатуне и шатунной шейке за время действия центробежной силы на элементарную порцию масла соизмеримо с диаметром маслоподающего отверстия d в шатуне, после чего в результате очевидных преобразований получили искомое выражение в виде:

$$\upsilon_c = \omega d.$$

Сопоставление показало, что скорость истечения струи υ_c пренебрежимо мала по сравнению с остальными компонентами скорости.

Необходимость учета сопротивления воздуха при расчете траектории струи потребовала введения в основные уравнения движения МТ специального коэффициента k, определяемого по известной формуле Стокса для сферического тела:

$$k = 3\pi d\mu,$$

где μ — динамическая вязкость воздуха.

Масса элементарной порции масляной струи m рассчитывалась как произведение объема элементарного цилиндра диаметром d и высотой d на плотность моторного масла ρ:

$$m = \frac{\pi d^3}{4}\rho.$$

Закономерности, описывающие движение МТ массой m в координатной системе XOY с учетом сопротивления воздуха и действия сил тяжести, были получены на основании второго закона Ньютона в форме системы дифференциальных уравнений 2-го порядка:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + k\dot{x} = 0; \\ m\ddot{y} + k\dot{y} + mg = 0, \end{cases}$$

где g — ускорение свободного падения.

После принятия граничных условий в виде задания начальных положений x_0, y_0 и начальных проекций скоростей v_{0x}, v_{0y} элементарной порции масла по координатам x и y вышеприведенная система уравнений была решена методом последовательного интегрирования. Полученные в результате решения аналитические выражения зависимостей координат МТ $x(t)$ и $y(t)$ были использованы в программе для построения траектории струи.

Интерфейс расчетной программы CRJet, представленный на рис. 5, содержит поле меню, демонстрационный блок, набор входных и визуально контролируемых параметров.

Входными параметрами являются: угол поворота коленчатого вала (КВ) [град.]; частота вращения КВ [мин$^{-1}$]; давление подачи масла [бар]; температура масла [°С]; ориентация сверления на нижней головке шатуна — "по оси шатуна" и "на стенку" ("на Н-стенку", "на НН-стенку"); при выборе варианта "на стенку" появляется дополнительный параметр — угол сверления маслоподающего отверстия на шатуне γ ("на Н стенку") и/или 2γ ("на НН стенку") [град.]; условный конус маслоподводящего канала в шатунной шейке (ШШ) [град.]; угол сверления маслоподводящего канала в ШШ — θ [град.]; при активации кнопки "Добавить проточку" появляются дополнительные параметры — угловая величина проточки от оси отверстия против часовой стрелки — φ [град.] и угловая величина проточки от оси отверстия по часовой стрелке — ψ [град.].

Примечание: сокращения Н и НН обозначают соответственно признак нагруженной и ненагруженной стороны (полуокружности) цилиндра.

Визуально контролируемыми параметрами являются: фазы (начало и отсечка), траектория, форма и зона омывания струи масла.

Методика проведения исследования

Была предусмотрена отладка (идентификация) расчетной модели на основе сопоставления контрольных расчетных данных с ранее полученными в работе [3] результатами экспериментов на макетной установке. Кроме того, методика включала оценку влияния частоты вращения коленчатого вала на характер процесса подачи струи из вращающейся кривошипной головки шатуна на стенку цилиндра и поршня.

Результаты и обсуждение

После выполнения первичной отладки (выявления и устранения процедурных ошибок работы) программы CRJet результаты расчетной визуализации процесса струйной маслоподачи были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными при прочих равных условиях на макетной установке. Из представленной на рис. 6 информации следует практически полная идентичность траекторий струи при математическом и макетном моделировании, что в совокупности с фактом совпадения полученных расчетом и экспериментом фаз струеобразования, указало на достоверность результатов расчета.

В ходе моделирования для серийной конструкции были определены угловая продолжительность

(фаза) существования струи масла *1* на тактах сжатие (выпуск) от момента зарождения до момента отсечки, а именно: зарождение — 286°(646°), отсечка — 311°(671°), продолжительность — 25° угла поворота коленчатого вала (рис. 7).

Анализ полученных результатов показал, что струйное маслоснабжение деталей ЦПГ в серийном исполнении шатуна и коленчатого вала на низких частотах вращения (примерно до 700 мин$^{-1}$) последнего обеспечивает в основном смазку только одного из двух имеющихся сопряжений "поршневой палец-бобышка поршня", расположенного ближе к маховику двигателя. Разбиваясь о нижнюю полуповерхность бобышки, струя масла омывает внутреннюю полость юбки поршня, не достигая внутренней поверхности днища поршня и, соответственно, не охлаждая ее. В условиях правого (по часовой стрелке) направления вращения кривошипа, подавляющая порция моторного масла в составе струи попадает на правую (ненагруженную) полуокружность внутренних поверхностей юбки поршня и, частично, цилиндра, что, как было экспериментально показано в работе [7], может вызывать аномальное распределение смазочного материала в сопряжении "цилиндр-поршень", при котором ненагруженная сторона цилиндра получает больше масла, чем нагруженная.

С увеличением частоты вращения коленчатого вала время струеобразования и, соответственно, объем моторного масла, вытекающего из маслоподающего отверстия за период угловой фазы дозирования, уменьшаются. Струя масла при этом теряет сплошную непрерывность, вырождаясь во фрагмент (или порцию), вылетающий из маслоподающего отверстия вращающейся кривошипной головки шатуна (рис. 8).

Как можно видеть из сопоставления рис. 6 и рис. 8, при увеличении частоты вращения коленчатого вала, начиная с некоторого значения, которое легко может быть определено с помощью программы CRJet, струя масла перестает попадать на бобышку, нарушая тем самым регламентированный инструкцией по эксплуатации рассматриваемого дизеля процесс смазки сопряжения "бобышка—поршневой палец". Вместо выполнения этой важной функции, порции масла, вылетающие из маслоподающего отверстия кривошипной головки шатуна, в основном омывают часть внутренней поверхности юбки поршня, примыкающую к ненагруженной стороне стенки цилиндра. Поскольку в этом случае моторное масло не выполняет ни смазывающую, ни охлаждающую функцию, такой характер струйного маслоснабжения также следует признать нерациональным.

Направленный поиск и тестирование с помощью программы CRJet вариантов иного, нежели существующий серийный, исполнения конструкции не только шатуна, но и шатунной шейки коленчатого вала показал реальную возможность управления характером процесса струйной подачи масла и разработки на этой основе рациональных технических решений для указанных деталей, обеспечивающих улучшение условий смазки и охлаждения трущихся сопряжений ЦПГ.

Заключение

В ходе выполнения НИОКР, связанных с анализом и модернизацией системы смазки дизеля 1Ч 8,5/8,0 (ТМЗ-450Д), разработанная для решения задач визуализации и оптимизации процесса струйного маслоснабжения деталей ЦПГ расчетная программа CRJet подтвердила адекватность результатов моделирования и показала эффективность применения при выполнении экспертных оценок условий работы системы смазки с традиционными ЦПГ и КШМ, а также поиске рациональных технических решений для элементов конструкции этих систем. Полученные с помощью программы CRJet результаты визуализации процесса струйной подачи масла на детали ЦПГ дизеля 1Ч 8,5/8,0 указали на ряд системных недостатков в организации маслоснабжения и возможность выполнения улучшающей модернизации конструкции с целью устранения этих недостатков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Путинцев С. В.** Анализ и постановка задачи маслоснабжения цилиндра четырехтактного поршневого двигателя // Тракторы и сельхозмашины. — 2015. — № 11. — С. 24—27.
2. **Путинцев С. В., Бикташев А. Ф., Гуськов А. В.** Обоснование и проект макетной установки для исследования условий маслоснабжения цилиндра четырехтактного быстроходного дизеля с воздушным охлаждением // Материалы XVIII Междунар. научно-практ. конференции "Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств". Владимир, 24—25 ноября 2016. — С. 255—258.
3. **Бикташев А. Ф., Путинцев С. В.** Макетная установка для прямой визуализации и оценки маслоснабжения деталей ЦПГ малоразмерного быстроходного дизеля с воздушным охлаждением // Проблемы и перспективы студенческой науки. — 2017. — № 1 (1). — С. 18—20.
4. **AVL EXCITE PISTON AND RINGS** [Электронный ресурс]. URL: https://www.avl.com (дата обращения 19.03.17).
5. **RICARDO PISDYN/RINGPAK** [Электронный ресурс]. URL: https://www.software.ricardo.com (дата обращения 19.03.17).
6. **Flowvision**: инженерный анализ смазки сложных механизмов [Электронный ресурс]. URL: https://flowvision.ru/index.php/press-release/426-flowvision-inzhenernyj-analiz-smazki-slozhnykh-mekhanizmov (дата обращения 20.07.17).
7. **Путинцев С. В., Агеев А. Г.** Экспериментальное исследование условий маслоснабжения цилиндра быстроходного четырехтактного ДВС // Тракторы и сельхозмашины. — 2016. — № 10. — С. 45—49.

УДК 629.35-235:551.581.2(211)

А. Ю. Барыкин, канд. техн. наук, доцент, Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, e-mail: aleks-jb@rambler.ru,
В. В. Лянденбурский, канд. техн. наук, доцент, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, e-mail: lvv789@yandex.ru, **Р. Х. Тахавиев,** ст. преподаватель, Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, e-mail: trh_ineka@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ УЗЛОВ ТРАНСМИССИИ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

В статье рассмотрены связи естественно-технической системы "автомобиль — окружающая среда", оказывающие весомое влияние при зимней эксплуатации грузового автомобиля в условиях Сибири и Крайнего Севера. Проведен краткий анализ причин отказов и сокращения срока службы деталей, подверженных воздействию внешних факторов. Предложена шкала температур исследуемых объектов, определяющая рациональные диапазоны действия систем подогрева узлов трансмиссии.

Ключевые слова: *грузовой автомобиль, трансмиссия, главная передача, зимняя эксплуатация, Сибирь, Крайний Север, тепловая подготовка, подогрев, температурный режим, ударная вязкость, расход топлива.*

The article discusses the context of natural-technical system "vehicle — environment" that have a significant impact on the winter operation of the truck in Siberia and the far North. A short analysis of the causes of failures and reduction of service life of parts exposed to external factors. The proposed scale of temperatures of examined objects, determines the rational range heating units of the powertrain.

Keywords: *truck, transmission, main gear, winter operation, Siberia, the far North, the heat preparation, preheating, temperature, impact strength, fuel consumption.*

Задача обеспечения эксплуатационной надежности автомобильного транспорта в холодное время года является весьма актуальной для большинства природно-климатических зон нашей страны. Определяющим фактором внешнего воздействия в данном случае является температура окружающего воздуха, допустимое минимальное значение которой указывается в инструкциях по эксплуатации автомобиля. Для автомобилей семейства КАМАЗ пригодность для эксплуатации ограничивается температурным диапазоном атмосферного воздуха −40...+40 °С [5].

При этом в ряде районов Сибири и Крайнего Севера возможно воздействие и более низких температур, до −60 °С и ниже. В [8] указано на сложность и трудоемкость эксплуатации автомобилей в холодных районах, занимающих большую часть территории страны, при температурах до −60...−65 °С и скорости ветра до 30 м/с, причем протяженность морозного периода может составлять 200...300 дней в году. В таких условиях работоспособность и долговечность двигателя и трансмиссии определяются комплексом мер по установлению и поддержанию рационального диапазона температур деталей, моторного и трансмиссионного масел.

Обзор применяемых методов обеспечения температурных режимов шасси показывает явную односторонность и недостаточность теплового воздействия. Разнообразие способов подогрева двигателя и обслуживающих его узлов (например, аккумуляторной батареи) сочетается с весьма ограниченным выбором средств тепловой подготовки узлов трансмиссии, в особенности привода колес (главная передача, дифференциал, полуоси; для ведущего управляемого моста — карданные передачи). В литературе по технической эксплуатации автомобильного транспорта можно встретить описание методов внешнего теплового воздействия (например, водой или паром) на двигатель и трансмиссию автомобиля, находящегося на открытой стоянке и готовящегося к выходу в рейс [6, 7]. Например, в [6] способ прогрева двигателя горячей водой (в диапазоне температур

70...90 °С), заливаемой в систему охлаждения, назывался наиболее простым и распространенным. Заметим, что в [6] не рекомендован пуск холодного двигателя с помощью буксира, в то же время ничего не сказано о возможности или невозможности использования буксира для преодоления сопротивления движению агрегатов трансмиссии.

Однако реализация таких методов возможна лишь в условиях крупных автотранспортных предприятий с централизованной подачей воды или пара к месту стоянки. Поэтому в большинстве случаев тепловая подготовка холодного автомобиля ограничивается применением электрофакельных устройств, предпусковых подогревателей и других бортовых средств прогрева двигателя. Детали трансмиссии и трансмиссионное масло к моменту запуска двигателя остаются неподготовленными и нагреваются в процессе движения автомобиля, т. е. в условиях воздействия внешних (со стороны дороги) и внутренних (со стороны двигателя — при бросках сцепления, переключении передач и т. п.) динамических нагрузок.

Особенности эксплуатации транспортных средств в холодное время года подробно рассмотрены в ряде работ отечественных ученых [1, 3]. В [6] отмечено отрицательное влияние повышенной вязкости масел в зимних условиях на условия смазки двигателя и агрегатов шасси, на прочность неметаллических деталей.

В работе [1] приведены зависимости ударной вязкости сталей 45 и 38ХА от температуры. Указано также на повышенную хрупкость деталей из чугуна, марганцовистых и других сталей, при охлаждении ниже −40 °С. При этом приведенный в [1] график ударной вязкости охватывает диапазон температур примерно от −180 до +5 °С. В данном случае нижние значения диапазона оказываются невостребованными в эксплуатации, а верхняя граница представляется заниженной. Вид кривых свидетельствует об увеличенной ударной вязкости при повышении температуры деталей не только в указанном диапазоне, но и далее. Исходя из графика [1] можно предположить бóльшую ударную вязкость деталей, прогретых до +20...+40 °С по сравнению с аналогичными деталями, имеющими меньшую температуру.

В. Ф. Платоновым установлено, что температура ведущих мостов и других агрегатов трансмиссии после начала движения повышается от начального значения, соответствующего температуре окружающей среды, до некоторой стабильной величины, сохраняющейся при неизменном режиме движения. При этом величина стабильной температуры агрегатов зависит от температуры воздуха, интенсивности обдува картеров и от других неустановленных факторов.

Так, в [3] содержатся данные по температуре главных передач передних и задних мостов при температуре воздуха −25...−30 °С и утверждается, что влияние скорости движения на перепад температур для главных передач передних мостов +8...+18 °С, для главных передач задних мостов бóльшие значения на 45...60 °С следует объяснить более интенсивным обдувом передней части автомобиля.

Однако приводимые в [3] зависимости температурного режима агрегатов автомобиля Урал-375Д указывают на обратную картину. Установившаяся температура переднего моста составляет +71...+72 °С при движении по шоссе и +61...+62 °С при движении по грунтовой дороге, температура заднего моста — соответственно +45...+46 °С и +50...+51 °С.

Кроме того, весьма важными являются сведения о продолжительности выхода агрегатов на установившийся температурный режим. По данным [3], временнóй диапазон составляет 45...70 мин для примерных значений температуры воздуха −20...−30 °С. Логично предположить, что эксплуатация при более низких температурах как в пределах допустимого диапазона, так и за ними, потребует большего времени стабилизации при снижении значений установившихся температур.

Изучение опыта эксплуатации в условиях низких температур позволяет выделить следующие факторы влияния на безотказность, долговечность и эффективность работы узлов трансмиссии.

1. Повышение вязкости трансмиссионного масла, ведущее, во-первых, к замедлению циркуляции и ухудшению условий смазки; во-вторых, к увеличению потерь мощности вследствие возникновения дополнительного трения, вызванного гидравлическим сопротивлением загустевшего масла и нарушением масляного слоя.

Данный фактор является причиной повышения расхода топлива и снижения срока службы деталей вследствие более интенсивного износа. Его влияние является существенным и находит отражение в нормативных документах. Так, в работе [4] имеется указание на необхо-

димость достаточно высокой температуры ведущих мостов (не менее +40 °С) при определении контрольного расхода топлива автомобилей КАМАЗ. Можно обоснованно предположить, что снижение температуры относительно указанного значения приведет к увеличению расхода топлива.

Известно также, что линейные нормы расхода топлива увеличиваются в зимнее время не только в северных районах (до 15 %) и в районах Крайнего Севера (до 20 %), но и в южных (до 5 %) и умеренных районах (до 10 %). При этом условной границей зимнего периода считается средняя температура ниже 0 °С [8].

2. Уменьшение линейных размеров деталей и соответствующее увеличение зазоров (или снижение натягов соединений), ведущее к нарушению рациональных условий контакта деталей и ускорению износа.

Наиболее существенными в данном случае могут оказаться колебания зазоров в парах трения скольжения (сателлит — шип крестовины дифференциала, полуосевая шестерня — чашка дифференциала) и предварительного натяга подшипников главной передачи. Во втором случае необходимо также учитывать снижение упругости регулировочных колец или втулок.

3. Снижение показателей прочности деталей, приводящее к поломкам вследствие динамических нагрузок.

Уменьшение прочности может оказаться недостаточным для возникновения поломок вследствие ударного воздействия. Однако в сочетании с уменьшением упругих свойств деталей, данное явление вполне вероятно, приведет к питингу или другим видам разрушения поверхности детали.

Кроме того, необходимо учитывать неизбежное возникновение температурных градиентов как по объему узла, так и по объему деталей, что приводит к дополнительным внутренним напряжениям.

Перечисленные факторы оказывают различное влияние в зависимости от выбранного варианта теплового воздействия на узел трансмиссии:

а) **внешнее тепловое воздействие отсутствует.** В этом случае влияние факторов максимально проявляется до момента выхода на установившееся значение температуры, определяемое окружающей средой и эксплуатационным прогревом. В меньшей степени влияние сохраняется во время эксплуатации (при стабильной температуре узла) и может усилиться при снижении температуры воздуха, продолжительных или частых остановках и т. п.;

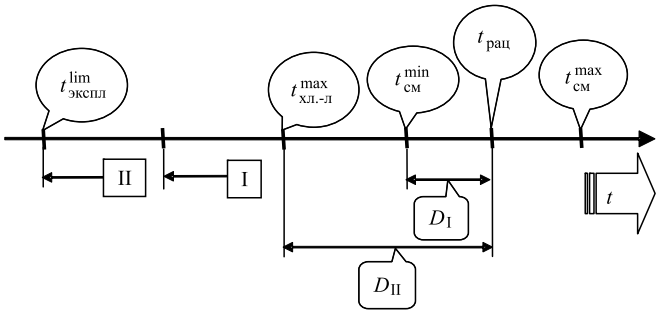
б) **производится подготовка к началу запуска, включающая прогрев ведущих мостов.** В данном случае влияние факторов будет заметным через некоторое время после начала движения, при условии сохранения недостаточно высоких значений установившихся температур или при влиянии побочных факторов, кратко обозначенных в пункте *а*;

в) **осуществляется контроль температурного режима узла трансмиссии и автоматическое включение бортовой системы подогрева во время движения.** Данный вариант исключает влияние всех факторов внешней среды.

В настоящее время при зимней подготовке автомобиля пренебрегают температурным состоянием трансмиссии, что является одной из причин снижения топливной экономичности, а также сокращения срока службы узлов и деталей.

Выбор рационального диапазона температур подогрева должен учитывать перечисленные выше факторы. С этой целью необходимо установить значения температур, ограничивающих их влияние.

Диапазон температур воздуха $\left\{t_{\text{экспл}}^{\min};\ t_{\text{экспл}}^{\max}\right\}$, приведенный выше для автомобилей КАМАЗ, задается нормативными документами (например, инструкция по эксплуатации [5]). Однако в реальных условиях Сибири и Крайнего Севера может возникнуть необходимость работы автомобиля при более низкой температуре $t_{\text{экспл}}^{\lim}$ (рисунок). Ее величина может опускаться до значений −50...−65 °С в зависимости от природно-климатической зоны [8].



Шкала температур объектов системы "автомобиль — окружающая среда"

Влияние холодного воздуха на показатели прочности деталей является весомым до определенного значения их температур $t_{хл.-л}^{max}$, при превышении которых не происходит поломок или ускорения разрушения. Величины $t_{хл.-л}^{max}$ могут различаться в зависимости от химического состава и свойств стали (сплава), условий нагружения и других параметров. Исходя из имеющихся сведений о поведении конструкционных материалов (в том числе приведенных выше), можно предположить, что $t_{хл.-л}^{max}$ находится в примерном диапазоне 0... +10 °С.

Приемлемый в эксплуатации размах величины кинематической вязкости трансмиссионного масла соответствует диапазону температур $\left\{t_{см}^{min};\ t_{см}^{max}\right\}$, зависящему от свойств конкретной марки масла и условий нагружения. Значение $t_{см}^{min}$ выбирается по критериям допустимого уровня повышения расхода топлива и ухудшения условий смазки. Можно предположить, что ориентировочные границы $t_{см}^{min}$ находятся в диапазоне +10...+30 °С. Значения $t_{см}^{max}$ определяются предельно допустимым уменьшением вязкости, позволяющим обеспечить приемлемые условия смазки. Весьма вероятно, что $t_{см}^{max}$ существенно зависит от тех же факторов, что и $t_{см}^{min}$, и не опускается ниже примерных границ +70...+80 °С.

Рациональная температура узла (или рациональная температура подогрева) $t_{рац}$ соответствует минимальным потерям на трение, с одной стороны, и минимально необходимому уровню подогрева, с другой стороны. Как точку отсчета для дальнейших исследований можно принять значение минимальной нормативной температуры ведущего моста при определении контрольного расхода топлива (приведены выше для автомобилей КАМАЗ).

С учетом изложенного температурный диапазон подогрева должен соответствовать значениям $\left\{t_{см}^{min};\ t_{рац}\right\}$ для нормативного понижения температуры воздуха $t_{экспл}^{min}$ (диапазон D_{I}), либо значениям $\left\{t_{хл.-л}^{max};\ t_{рац}\right\}$ для экстремального понижения температуры воздуха $t_{экспл}^{lim}$ (диапазон D_{II}).

Нормативное значение принимается исходя из инструкций по эксплуатации, а экстремальное — исходя из сведений о средних температурах холодного периода года для региона эксплуатации.

Уточнение границ подогрева может быть осуществлено при получении достоверных сведений по следующим вопросам:

1) насколько повышается расход топлива при понижении температуры подогрева от $t_{рац}$ до $t_{см}^{min}$ или $t_{хл.-л}^{max}$?

2) в какой степени уменьшается расход энергии на подогрев при указанном понижении температуры?

Ответ на данные вопросы позволит выбрать оптимальные границы регулирования температуры узлов трансмиссии с помощью бортовой системы подогрева, повысить топливную экономичность и долговечность деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бакуревич Ю. Л., Толкачев С. С., Шевелев Ф. Н.** Эксплуатация автомобилей на Севере. — М.: Транспорт, 1973. — 180 с.
2. **Семенов Н. В.** Эксплуатация автомобилей в условиях низких температур. — М.: Транспорт, 1993. — 190 с.
3. **Платонов В. Ф.** Полноприводные автомобили. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1989. — 312 с.
4. **Унгер Э. В., Левин В. И., Этманов С. Я., Машатин И. М.** Устройство и техническое обслуживание автомобилей КАМАЗ. — М.: Транспорт, 1976. — 392 с.
5. **Автомобили КАМАЗ.** Инструкция по эксплуатации / Сост. В. А. Трынов; Под ред. Д. Р. Пергамента. — М.: Машиностроение, 1982. — 336 с.
6. **Юрковский И. М.** Вождение автомобиля в сложных дорожных условиях. 2-е изд. перераб. и доп. — М.: ДОСААФ, 1976. — 125 с.
7. **Гинзбург З. С.** Пуск автомобильных двигателей зимой. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 44 с.
8. **Роговцев В. Л., Пузанков А. Г., Олдфильд В. Д.** Устройство и эксплуатация автотранспортных средств. — М.: Транспорт, 1991. — 432 с.

УДК 629.341:004.891.3

В. А. Максимов, д-р техн. наук, профессор, **А. А. Завгородний,** инженер, МАДИ,
П. В. Максимов, инженер, **А. А. Назаров,** канд. техн. наук, **Н. В. Поживилов,** канд. техн. наук,
ГУП "Мосгортранс"
E-mail: vamaximov57@mail.ru

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ УДЕЛЬНОЙ ТРУДОЕМКОСТИ ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА АВТОБУСОВ ЛиАЗ-529221 И ЛиАЗ-621321 В ЭКСПЛУАТАЦИИ

В последнее время в автобусные парки ГУП "Мосгортранс" поступает новый низкопольный подвижной состав. Это автобусы Евро 4 и Евро 5. Они имеют основные узлы, системы и агрегаты, изготовленные различными производителями. Для эффективной работы автобусных предприятий необходимо создавать новую нормативную базу, отражающую особенности эксплуатации поступающего подвижного состава. Это в полной мере относится к удельной трудоемкости текущего ремонта автобусов ЛиАЗ-529221 и ЛиАЗ-621321.

Ключевые слова: *автобусы, городские автобусы, подвижной состав, нормативы, эксплуатация подвижного состава, текущий ремонт, удельная трудоемкость текущего ремонта автобусов.*

Recently, in bus parks GUP "Mosgortrans" received new low-floor rolling stock. These are Euro 4 and Euro 5 buses. They have the main components, systems and units manufactured by different manufacturers. For the efficient operation of bus companies must establish a new regulatory framework reflecting the operating features of the incoming rolling stock. This fully applies to the specific complexity of the current repair of buses LiAZ-529221 and LiAZ-621321.

Keywords: *buses, city buses, rolling stock, standards, operation of rolling stock, maintenance, specific labor intensity of current repair of buses, motor company, bus fleet.*

Общие положения

Любое предприятие или компания может эффективно работать, имея соответствующие планы и программы производства и развития. Для составления и реализации этих планов и программ организация должна располагать обоснованными нормативами. Под нормативом понимается количественный или качественный показатель, используемый для упорядочения процесса принятия и реализации решений.

На автотранспортных предприятиях (АТП) нормативы используются при определении уровня работоспособности автомобилей и парка, выработке и принятии управленческих решений, планировании объемов работ, определении необходимого числа исполнителей, потребности в производственной базе, в технологических расчетах и т. д.

К важнейшим нормативам технической эксплуатации относятся периодичность ТО, ресурс изделия до ремонта, трудоемкость технического обслуживания (ТО), удельная трудоемкость текущего ремонта (ТР), расход запасных частей и эксплуатационных материалов и др. Обычно определение нормативов по ТО и ремонту производится на основе теоретических предпосылок, аналитических расчетов и данных о надежности изделий, расходе материалов и продолжительности и стоимости проведения работ ТО и ремонта.

Целью проводимых исследований является проведение наблюдений и сбор статистической информации по фактической трудоемкости ТР, фактическим пробегам и наработке на отказ автобусов ЛиАЗ-529221 и ЛиАЗ-621321 для разработки системы технико-экономических показателей указанного подвижного состава, включая нормативы удельной трудоемкости ТР в условиях авто-

бусного парка филиала ГУП "Мосгортранс". Объектом исследований являются автобусы ЛиАЗ-529221 и ЛиАЗ-621321, выполняющие работу по перевозке пассажиров на городских маршрутах.

Сбор информации по фактической трудоемкости ТР, фактическим пробегам и наработкам на отказ автобусов ЛиАЗ-529221 и ЛиАЗ-621321 (объем наблюдений, продолжительность наблюдений, периодичность наблюдений, формы отчетности и др.) проводится на базе филиалов ГУП "Мосгортранс".

Исследования проводятся по утвержденной Программе-методике, разработанной с учетом действующих ГОСТов, Положения о ТО и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта, отраслевых стандартов и других нормативных документов. Хранение подконтрольных автобусов за весь период исследований — безгаражное на открытой площадке.

Техническое обслуживание (ТО) и текущий ремонт (ТР) подконтрольных автобусов за весь период исследований должны выполняться в соответствии с требованиями "Руководства по техническому обслуживанию и ремонту автобусов", "Типовых технологий по ТО и ТР автобусов ЛиАЗ-5292 и ЛиАЗ-6213", рекомендациями "Положения о ТО и ремонте автобусов модели ЛиАЗ-529221, ЛиАЗ-621321, ЛиАЗ-529222, ЛиАЗ-621322", утвержденных в ГУП "Мосгортранс".

Система поддержания подконтрольных автобусов за весь период исследований в работоспособном состоянии не должна противоречить рекомендациям завода-изготовителя подвижного состава. Обработка полученной статистической информации должна осуществляться по стандартным процедурам. Оценка эффективности полученных показателей осуществляется путем их сравнения с требованиями, действующими в Российской Федерации, нормативных документов.

При сборе данных о работе автобусов ЛиАЗ-529221 и ЛиАЗ-621321 на городских маршрутах, отказах и фактических трудоемкостях текущего ремонта были установлены следующие ограничения:

— в выборочную совокупность включались автобусы ЛиАЗ-529221 и ЛиАЗ-621321, находящиеся на балансе филиала Юго-Западный ГУП "Мосгортранс";

— в выборочную совокупность не включались ремонтные операции, которые производились заводом-изготовителем на гарантийном пробеге.

Объем выборки для получения достоверного материала определялся по стандартным методикам [1—4, 10]. При непараметрическом методе (когда вид закона распределения неизвестен) объем выборки для оценки неизвестного закона надежности определяется по формуле

$$N = \frac{\ln(1-\beta)}{\ln P(x)}, \qquad (1)$$

где β — доверительная вероятность (задается с учетом того, чтобы за наработку x не произошло отказа — в области эксплуатации автомобильного транспорта находится в пределах от 0,8 до 0,95); $P(x)$ — требуемая вероятность безотказной работы в течение некоторой наработки x (в области эксплуатации автомобильного транспорта обычно принимается равной 0,9).

Так, например, для изучения характеристик надежности узлов и агрегатов, обеспечивающих безопасность движения автомобиля — это максимальный уровень надежности, объем минимальной выборки должен составлять не менее 28 [2, 3]:

$$N = \frac{\ln(1-0,95)}{\ln 0,9} = 28. \qquad (2)$$

В проводимых исследованиях объем выборки по автобусам ЛиАЗ-529221 составляет 95 ед., а по автобусам ЛиАЗ-621322 составляет 50 ед., что удовлетворяет указанным условиям (см. формулу (2)). Фактическая продолжительность наблюдений должна охватывать как минимум период эксплуатации автобусов ЛиАЗ-529221 и ЛиАЗ-621322, оговоренный в техническом задании.

Для конкретизации наблюдений за подконтрольными автобусами и более детального исследования изменений удельной трудоемкости текущего ремонта в зависимости от пробега подвижного состава с начала эксплуатации в соответствии с рекомендациями Положения о ТО и ремонте ПС автомобильного транспорта [8, 10] целесообразно сформировать подконтрольные группы автобусов по возрасту с интервалом $0,25L_{КР}$:

1 группа — пробег с начала эксплуатации от 0 до 200 000 км;

2 группа — пробег с начала эксплуатации от 200 001 до 400 000 км;

3 группа — пробег с начала эксплуатации от 400 001 до 600 000 км;

4 группа — пробег с начала эксплуатации от 600 001 до 800 000 км;

5 группа — пробег с начала эксплуатации свыше 800 001 км;

Периодичность наблюдений за подконтрольными автобусами, поступившими в текущий ремонт, осуществляется ежесуточно.

Определение удельной трудоемкости текущего ремонта

Трудоемкость t — это затраты труда на выполнение в заданных условиях операции или группы операций ТО или ремонта [10]. На автомобильном транспорте трудоемкость измеряется в чел.-ч или чел.-мин. Различают нормативную, фактическую и удельную трудоемкость: нормативная трудоемкость является официальной юридической нормой, принятой на данном предприятии, фирме и т. д. Обычно она используется для определения численности исполнителей и оплаты труда исполнителей. Фактическая трудоемкость — затраты труда на выполнение конкретной операции конкретным исполнителем. Является случайной величиной и может отличаться от нормативной. Удельная трудоемкость — затраты труда на выполнение конкретной операции или группы операций, отнесенные к пробегу подвижного состава. Удельная трудоемкость текущего ремонта является случайной величиной. Она измеряется и нормируется обычно в чел.-ч/1000 км или чел.-мин/1000 км.

При нормировании трудоемкости текущего ремонта в автотранспортных предприятиях используют хронометражные наблюдения, при этом целесообразно вести специальный протокол. При хронометражных наблюдениях [10] обычно определяется оперативное время ($t_{оп}$), а остальные элементы нормы назначаются по согласованию с профсоюзами в процентах от оперативного (a_i):

$$t_н = \underbrace{kt_{оп}}_{\text{Определяются по результатам наблюдений или расчетам}} \left(1 + \underbrace{\frac{a_{пз} + a_{обс} + a_{отд}}{100}}_{\text{Назначаются в зависимости от особенностей операции, тяжести и условий труда}}\right) \quad (3)$$

Коэффициент повторяемости (K) учитывает вероятность выполнения помимо контрольной и исполнительскую часть операции. При выполнении ремонтных операций $K = 1$.

Для слесаря-ремонтника по отношению к оперативному времени доля других элементов нормы (a_i) составляет [5]:

— подготовительно-заключительное: $a_{пз} = 3{,}5$ %;

— обслуживание рабочего места: $a_{обс} = 2{,}5$ %;

— перерыв на отдых и естественные нужды: $a_{отд} = 6$ %.

Нахождение оперативного времени ремонтной операции, которая еще не выполнялась в условиях автобусного парка, целесообразно проводить следующим образом.

Необходимо выбрать объект наблюдения (рабочее место, оборудование, ремонтная операция). При этом рабочее место должно быть аттестовано.

Наблюдения целесообразно проводить в следующей последовательности.

Сначала определяют объем наблюдений для получения среднего значения времени выполнения работ $\bar{t}$, полагая, что оно подчиняется нормальному закону распределения. Для нормального распределения объем выборки рассчитывают из условия [2, 3, 10]:

$$N \geqslant \frac{t^2\sigma^2}{\varepsilon^2}, \quad (4)$$

где t — обращенное значение функции Лапласа; σ^2 — дисперсия оценки; ε — точность вычисления выборочной средней $(\bar{X})$.

Учитывая, что точность ε может быть выражена через относительную точность $\varepsilon_о = \varepsilon/\bar{X}$, то формулу (4) можно записать следующим образом:

$$N \geqslant \frac{t^2\sigma^2}{\varepsilon_о^2\bar{X}} \geqslant \frac{t^2V^2}{\varepsilon_о^2}, \quad (5)$$

где V — коэффициент вариации.

В области техники обычно используют пяти- и однопроцентный уровень значимости, которому соответствуют значения t, равные 1,96 и 2,58. Отсюда по выражению (5) можно легко рассчитать объемы выборки для рекомендуемых условий [2, 3, 9] при значениях относительной точности 0,05, 0,10, 0,15 и 0,20 [2, 3, 9]. Результаты расчета для предельно расширенного диапазона коэффициентов вариации 0,1...0,4 приведены в таблице.

Далее следует провести необходимое число наблюдений (хронометражей) за фактической продолжительностью выполнения ремонтной операции t_i. По формуле (6) определяют среднее значение трудоемкости подконтрольной j-й ремонтной операции в k-й возрастной группе $(\bar{t}_{jк})$:

$$\bar{t}_{jk} = \sum_{i=1}^{n} t_{ijk} \Big/ n, \quad (6)$$

где n — число наблюдений.

Среднестатистический норматив трудоемкости подконтрольной j-й ремонтной операции в k-й возрастной группе $\left(t_{jk}^{Н}\right)$ вычисляют:

$$t_{jk}^{Н} = \bar{t}_{jk}. \quad (7)$$

Объем выборки для нормального распределения [2, 3]

Уровень значимости q	Коэффициент вариации V	Относительная точность ε_o			
		0,05	0,10	0,15	0,20
0,05	0,1	16	4	2	1
	0,2	62	16	7	4
	0,3	138	36	16	9
	0,4	245	62	28	16
0,01	0,1	27	7	3	2
	0,2	107	27	12	7
	0,3	240	60	27	15
	0,4	697	174	78	27

Если необходимо определить прогрессивный норматив трудоемкости подконтрольной j-й ремонтной операции в k-й возрастной группе $\left(t_{jk}^{\text{Н}}\right)$, то целесообразно использовать следующую формулу:

$$t_{jk}^{\text{НП}} = \overline{t}_{jk} - \sigma_{jk}, \qquad (8)$$

где σ_{jk} — среднее квадратичное отклонение трудоемкости подконтрольной j-й ремонтной операции в k-й возрастной группе, чел.-мин. Норматив суммарной трудоемкости ремонтных операций в k-й возрастной группе $\left(t_k^{\text{Н}}\right)$:

$$t_k^{\text{Н}} = \sum_{j=1}^{m} \overline{t}_{jk}, \qquad (9)$$

где m — количество ремонтных операций, имевших место у подконтрольных автобусов к-й возрастной группы.

Суммарный пробег подконтрольных автобусов k-й возрастной группы $\left(L_k^A\right)$ определяют:

$$L_k^A = \sum_{p=1}^{p} L_{pk}^A, \qquad (10)$$

где p — количество подконтрольных автобусов в k-й возрастной группе, ед.; L_{pk}^A — пробег p-го подконтрольного автобуса в k-й возрастной группе, тыс. км.

Норматив суммарной удельной трудоемкости текущего ремонта (ремонтных операций) в k-й возрастной группе $\left(t_{\text{УД}k}^{\text{Н}}\right)$ вычисляют по:

$$t_{\text{УД}k}^{\text{Н}} = t_k^{\text{Н}} / L_k^A. \qquad (11)$$

Допускается определять норматив суммарной удельной трудоемкости текущего ремонта (ремонтных операций) в k-й возрастной группе по удельной трудоемкости текущего ремонта (ремонтных операций) в k-й возрастной группе по постовым работам ТР с последующим пересчетом трудоемкостей по соотношению постовых и цеховых работ ТР [6].

Документация по исследованиям

В процессе исследований используется и ведется следующая документация:

— дефектовочная ведомость по ремонту основного средства;

— журнал "Заявки с линии";

— журнал "Ремонтные заявки";

— ремонтный листок;

— путевой лист автобуса;

— протоколы отдельных исследований;

— сводная ведомость отказов, неисправностей и дефектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Айвазян С. А.** и др. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. — М.: Финансы и статистика, 1983. — 471 с.
2. **Болдин А. П., Максимов В. А.** Основы научных исследований: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский центр "Академия", 2014. — 352 с.
3. **Болдин А. П., Максимов В. А.** Основы научных исследований: учебник для вузов. — М.: Издательский центр "Академия", 2012. — 336 с.
4. **Венецкий И. Г., Венецкая В. И.** Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе: справочник. 2 изд., перераб. и доп. — М.: Статистика, 1979. — 447 с.
5. **Основы** эффективного использования шин в условиях автобусного АТП: учебное пособие / В. А. Максимов, Р. И. Исмаилов, П. В. Максимов, А. А. Назаров / Под ред. В. А. Максимова. — М.: МАДИ, 2016. — 163 с.
6. **Опытная апробация** и совершенствование методики технического расчета производственно-технической базы (ПТБ) для объединенных филиалов и филиалов ГУП "Мосгортранс", эксплуатирующих автобусы, работающие на компримированном природном газе (КПГ). Отчет по НИР. — М., 2016. — 131 с.
7. **Положение** о ТО и ремонте автобусов модели ЛиАЗ-529221, ЛиАЗ-621321, ЛиАЗ-529222, ЛиАЗ -621322. Утв. ГУП "Мосгортранс" 10.08.2015 г.
8. **Положение** о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта. Министерство автомобильного транспорта РСФСР. — М.: Транспорт. 1988. — 78 с.
9. **РД 50-690-89.** Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 132 с.
10. **Техническая эксплуатация автомобилей**: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и допол. / Е. С. Кузнецов, А. П. Болдин, В. М. Власов и др. — М.: Наука, 2001. — 535 с.

УДК 629.113

В. Н. Козловский, д-р техн. наук, СамГТУ, г. Самара, **А. В. Заятров,** канд. техн. наук, ТГУ, г. Тольятти, **М. М. Васильев,** канд. экон. наук, МИР, г. Самара, **Е. В. Полякова,** канд. техн. наук, ПВГУС, г. Тольятти
E-mail: kozlovskiy-76@mail.ru

ЭТАПЫ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЕКТОВ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И АВТОМОБИЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ

В работе представлены результаты исследования в области развития производственных технологий создания электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой.

Ключевые слова: *автомобилестроение, электромобиль, автомобиль с комбинированной энергоустановкой.*

The paper presents the results of research into the development of production technologies for the creation of electric vehicles and hybrids.

Keywords: *motor industry, electric car, hybrid.*

Широкий диапазон изменения разрядного тока является характерной особенностью работы тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ), устанавливаемых на электромобилях (ЭМБ) и автомобилях с комбинированной энергоустановкой (АКЭУ), что обусловлено влиянием режимов нагрузки, определяемых многофакторностью и вероятностным характером воздействия внешней среды [1—3].

Решение проблемы повышения эффективности ЭМБ и АКЭУ напрямую связано с повышением эффективности комплекса ТАБ, устанавливаемых на рассматриваемые АТС. Эффективность ТАБ зависит от целого набора выходных параметров, определяющих эксплуатационные требования, а также зависит от комплекса конструкторско-технологических характеристик заложенных в устройство при проектировании и реализованных в производстве, который образует группу входных параметров. Понятно, что определение связи между группами входных и выходных параметров для сложного технического устройства в современных условиях должно быть проведено с учетом требований рациональности соответствующего исследовательского процесса. Реализация требований рациональности возможна при использовании современных методов моделирования ТАБ. Наиболее широкое распространение в решении задачи математического моделирования ТАБ получила формула Пейкерта [4]:

$$I_{\text{р}}^{n} t_{\text{р}} = C, \qquad (1)$$

где n показатель степени и постоянная C — находятся опытным путем для каждого типа батареи; $I_{\text{р}}$, t_p — ток и время разряда, или:

$$Q = C I_{\text{р}}^{1-n}, \qquad (2)$$

здесь Q — емкость ТАБ, отданная при разряде током $I_{\text{р}} = \text{const}$.

Если ток разряда $I_{\text{р1}}$ не постоянный, то емкость Q_1 рассчитывается по измененной формуле Пейкерта: $Q_1 = Q\left(I_{\text{р}}/I_{\text{р1}}\right)^{n-1}$.

Емкость батареи при разных периодах разряда определяется по формуле

$$Q_1 = Q\left(t_{\text{р1}}/t_{\text{р}}\right)^{m},$$

где $m = 1 - 1/n$.

Наиболее общий вид для всех основных типов АКБ у формулы остаточной емкости при разряде средними и малыми токами

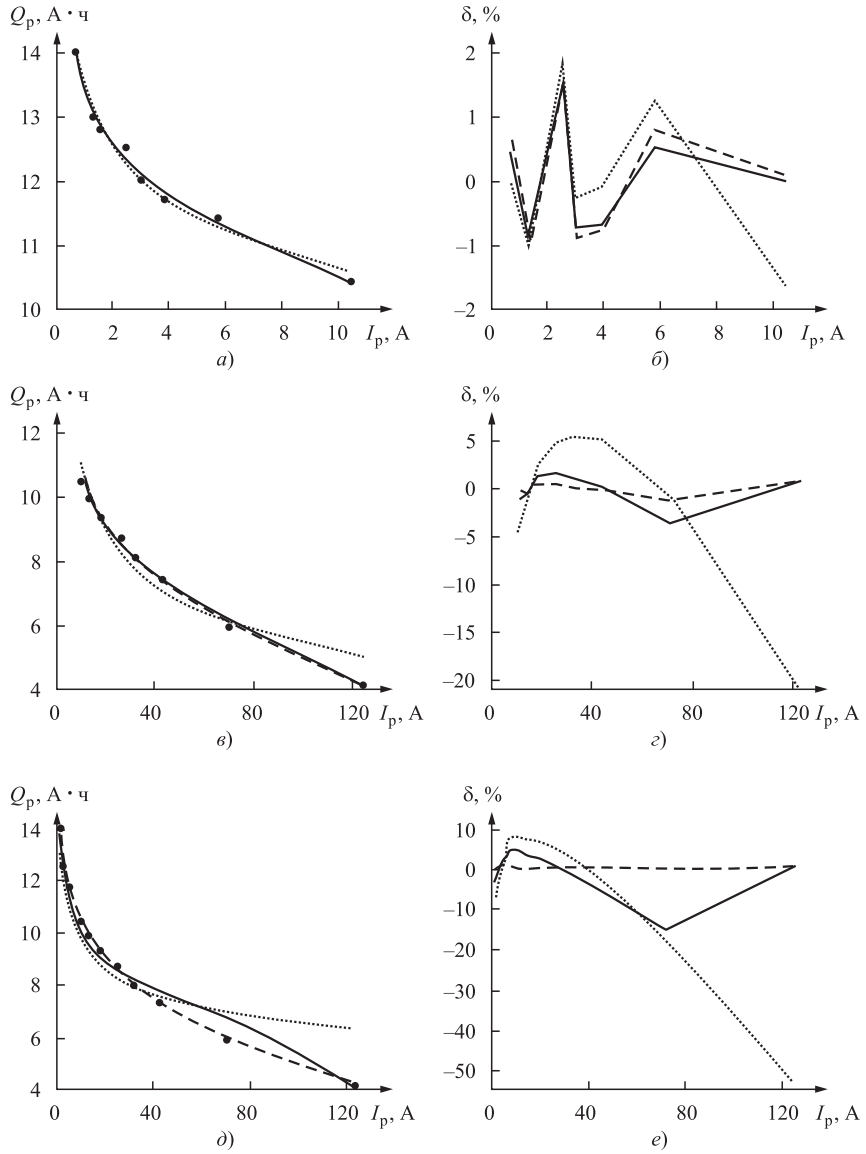
$$Q = \left(Q_{\text{ном}}/B\right)\left(t_{\text{рном}}/t_{\text{р}}\right)^{m}, \qquad (3)$$

где B — константа, определяемая экспериментально.

Для различных значений токов разряда емкость можно пересчитать по выражению:

$$Q = \left(Q_{\text{ном}}/B\right)\left(I_{\text{р}}/I_{\text{рном}}\right)^{n-1} \qquad (4)$$

При малых значениях временных интервалов разряда и больших токах:



Характеристика разряда ТАБ "Оптима" и погрешности их аппроксимации при различных токах разряда

$$Q=\left(\frac{Q_{ном}}{B}\right)\left[\left(\frac{t_р}{t_{рном}}\right)^{\alpha}-\frac{2Q_{ном}E_a}{t_{рном}I_k\left(E_{ТАБ}-U_{кр}\right)}\right]^{\beta}, \quad (5)$$

где E_a — ЭДС ТАБ; $I_k=E_a/R_a$ — ток к.з.; R_a — собственное сопротивление батареи; $U_{кр}$ — напряжение в конце цикла разрядки; B, α, β — константы.

Выражение (5) для тока разрядки $I_р$ имеет вид

$$Q=\left(\frac{Q_{ном}}{B}\right)\left[\left(\frac{I_р}{I_{рном}}\right)^{\alpha}-\frac{2Q_{ном}E_a}{t_{рном}I_k\left(E_a-U_{кр}\right)}\right]^{\beta}. \quad (6)$$

На основании (6) предлагается математическая модель разрядных характеристик аккумуляторных батарей для различных токов разрядки:

$$Q=\frac{I_р}{A}\left[\left(\frac{I_р}{I_{рном}}\right)^{\alpha}-B\right]^{\beta}. \quad (7)$$

Математическая модель (7) адекватна для свинцовых, литий-ионных и никель-металлгидридных аккумуляторных батарей. Для определения адекватности предложенных математических моделей проведен анализ на примере разрядной кривой свинцово-кислотной ТАБ "Оптима" (ф. "Optima", США). Исследования проводились для малых и средних токов разряда — от 0,7 до 10,4 А; и рабочих токов диапазона — от 13,2 до 123,9 А.

Полученные результаты моделирования имеют несущественные отличия от реальных характеристик. В связи с этим можно сделать ряд выводов:

— для малых токов разряда относительные погрешности трех моделей отличаются незначительно (рисунок *а*, *б*), поэтому целесообразно пользоваться формулой Пейкерта;

— для средних и больших токов наилучшие результаты обеспечивает предложенная модель (7) (рисунок *в*, *г*), а при разряде токами всего диапазона — от минимального до тока к.з. (рисунок *д*, *е*), относительная погрешность аппроксимации по модели (7) не превышает 1,15 %.

Предложенные модели разрядных характеристик могут быть использованы для расчета массогабаритных параметров как для ЭМБ или АКЭУ в целом, так и для выбора ТАБ и комплекса силового электрооборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Аналитическое моделирование** тяговой системы электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В. И. Строганов, В. Н. Козловский, А. Г. Сорокин, Л. Н. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — № 7. — С. 107—113.
2. **Математическое моделирование** основных процессов электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В. И. Строганов, В. Н. Козловский, А. Г. Сорокин, Л. Н. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — № 7. — С. 129—133.
3. **Строганов В. И., Козловский В. И.** Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства: монография. — М.: МАДИ, 2014. — 304 с.
4. **Peukert W.** Über die Abhängigkeit der Kapazität von der Entladestromstärke bei Bleiakkumulatoren, Elektrotechnische Zeitschrift 20.

УДК 629.113.52

Ю. В. Воробьев, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО Тамбовский государственный технический университет, e-mail: profvorobev@mail.ru, **А. В. Дунаев,** канд. техн. наук, ФГБНУ "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ", Москва, e-mail: dunaev135@mail.ru

АКТИВАЦИЯ МОТОРНЫХ ТОПЛИВ

Изложены особенности модификации моторных топлив активатором по патенту РФ № 2411074, когда облегчается фракционный состав и продолжается модификация топлив после их выхода из активатора. Необратимость модификации обеспечивает сокращение расхода топлив на 20...27 % без уменьшения мощности ДВС, уменьшается дымность отработавших газов дизелей, их токсичность у бензиновых ДВС, уменьшается температура замерзания дизельного топлива, оно очищается от смол и соединений серы. Активатор проверен тремя стендовыми моторными испытаниями в РФ, в Рочестер-Центр (США), контролем химмотологических показателей восьми марок бензинов и трех марок дизельного топлива, десятками хромотограмм топлив до и после активации, контролем температуры замерзания и дымности дизелей.

Ключевые слова: *механохимия, фракционный состав, химмотология, расход топлива.*

The modification of motor fuels by the activator according to the patent of Russian Federation № 2411074 when facilitated fractional composition and the modification of the fuels after they are released from the activator. The irreversibility of the modification provides a reduction in the consumption fuel by 20...27 % without reducing the power of the internal combustion engine, reduces the opacity in diesel engines of exhaust gases with smoke, their toxicity in petrol engines, reduces the freezing point of diesel fuel, it should be cleaned of in diesel furl tars and sulphur compounds.

Activator tested three bench engine tests in Russia, in Rochester (USA), control hematologically indicators of eight grades of gasoline and three grades of diesel fuel, tens of chromatogram fuels before and after activation, the temperature control for freezing and smoke of diesel engines.

Keywords: *mechanochemistry, fractional composition, chemmotology, fuel consumption.*

Непрерывное совершенствование автотракторных ДВС проводится для повышения их надежности, ресурса, коэффициента полезного действия, для уменьшения расхода топлива, токсичности и дымности отработавших газов (ОГ). Для повышения топливной экономичности ДВС во многих странах длительное время испытываются весьма разнообразные магнитная [1—3], гомогенизация моторных топлив [4], кавитационная [5—7], электрическая, триботехническая [8] обработка присадок. В последнее время опробована и механохимическая активация топлив [9—11].

Так, например, создан статический смеситель-активатор (далее — активатор) по патенту РФ № 2411074 [10, 11]. Активатор (рис. 1) в цилиндре длиной 150 мм, диаметром 30...50 мм имеет три последовательные камеры, встраивается в любую топливную систему ДВС, не требует привода, не содержит химических веществ, не уменьшает ресурс ДВС.

Действие активатора на топливо проводится в трех камерах [10, 11]. В первой происходит встречное винтообразное перемешивание и растирание струй, предполагается дробление кластеров. Из первой камеры во вторую струи продавливаются через капилляры и идет кавитационное дробление молекул. В третьей камере — продавливание фрагментов молекул через микрощели, что продолжает их разрыв. Такое трехкратное воздействие обусловливает необратимость механоактивации — особое достоинство активатора по патенту № 2411074.

Активатор многократно проверен хроматографией различных топлив [10], контролем их расхода [11] и выброса вредных веществ с ОГ автотракторных

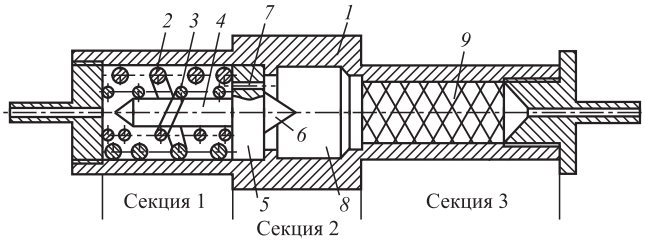


Рис. 1. Схема комбинированного статического смесителя-активатора по патенту РФ № 2411074:

1 — корпус; *2* и *3* — витые элементы; *4* — стержень; *5* — диск с микроканалами; *6* — конус стержня; *7* — каналы; *8* — промежуточная камера; *9* — смеситель из перекрещивающихся решеток

ДВС. Хроматограммы активированного дизельного топлива и бензина разных поставщиков показали уменьшение доли тяжелых углеводородов и образование легких: гексана, гептана, 3метил-пентана до 37 %, а также снижение содержания серы с 0,032 до 0,015 %, а смол с 7,4 до 0,8 мг/100 мл. В бензине содержание октаноопределяющего толуола повышалось до 16 %, а в авиакеросине — нонана и декана — до 21 %. Активатор апробирован и на биотопливе.

Для проверки активатора с ним проведены такие исследования:

1. Стендовые испытания двигателя КАМАЗ-740 в июле 2011 г. в военном авиационном инженерном университете (г. Воронеж).

2. В то же время и там же — стендовые испытания двигателя ЗМЗ-406.

Эти испытания показали уменьшение расхода дизельного топлива с разными активаторами на 26,5 и на 28,6 %, а бензина на 21,3, 27,7 и 31,9 % с заметным снижением в ОГ содержания углеводородов.

3. Двухмесячные в 2013 г. испытания в ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии активированных автомобильных бензинов Нормаль-80, Регуляр-92, Премиум-95, Супер-98 по ГОСТ Р 51106—97, бензинов АИ-92 по ТУ 38.001165—97, АИ-98 по ТУ 38.401-58-127—95, бензинов "Суперлюкс" и "Премиум" Британской компании "Beyond petroleum" (ранее — "Бритиш петролеум") по комплексу методик ускоренных испытаний нефтепродуктов на натурных агрегатах, модельных одноцилиндровых установках, а также в ДВС, в сочетании с испытаниями по методикам контроля, указанным в НТД на каждый нефтепродукт.

4. Аналогично испытаны дизельные топлива сортов В и С вид II, а также топливо класса 1 вид I по ГОСТ Р 52368—2005 (ЕН 590:2009) Топливо дизельное Евро.

Исследования активированных топлив показали:

— активатор эффективно повышает эксплуатационные и экологические свойства топлив, изменяя качественный, количественный состав и структуру углеводородов;

— уменьшается содержание углеводородов с числом атомов углерода более 10 (особенно высококипящих фракций) с синтезом легких углеводородов (гексан, гептан, 3 н-пентан);

— концентрация образующих активатором легких углеводородов превышает 20 %;

— содержание серы в топливах уменьшается в 1,5—2 раза, а фактических смол до 9 раз;

— содержание в ОГ ДВС токсичных газов уменьшается по CO на 79 %, по NO и NO_2 до 14 %.

5. В июле 2014 г. усовершенствованный активатор испытан в ВУНЦ Военно-воздушной академии им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина на дизеле ЯМЗ-236 с тремя разными топливами при установках активатора в магистрали подачи топлива в ТНВД и в магистрали слива из него [11]. На холостом ходу дизеля при частоте вращения коленчатого вала 900...1300 мин$^{-1}$ в одиннадцати испытаниях выявлено уменьшение расхода топлива в среднем на 26,3 % (табл. 1).

6. Активатор испытан и в Rochester Institute of Technology (США) [10], где показано уменьшение в моторных топливах содержания серы до 50 %, смол в 7—9 раз, выбросов в ОГ: NO — до 17 %, NO_2 — до 14 %, а CO — до 49 %. Непонятным здесь явилось увеличение активацией массы дизельного топлива на 2,49 %.

7. В 2009—2016 гг. в г. Тамбове проведены эксплуатационные испытания десятка активаторов на отечественных и импортных автомобилях с бензиновыми и дизельными двигателями с особенно заметным сокращением расхода бензина.

Десятками хроматограмм показано, что активатор заметно изменяет фракционный состав бензинов, дизельных топлив, авиакеросина, биотоплива. Так, в дизельном топливе может образоваться подавляющее (до 30 %) содержание октана, отсутствующего в исходном топливе. А на рис. 2 показан результат неординарной модификации дизельного топлива компании Лукойл с резким уменьшением необычно большого исходного количества тяжелых компонентов. Соответствующие изменения химмотологических показателей дизельного топлива показаны в табл. 2, а бензина — в табл. 3.

Таблица 1

Результаты испытаний усовершенствованного активатора

Частота вращения коленчатого вала, мин$^{-1}$	Наличие активатора	Расход топлива, г, за 5 мин испытаний	Экономия, мл/%
1100	+	267	71/21,0
1100	+	253	85/25,2
1100	–	**338**	—
1100	+	267	71/21,0
1280...1300	+	244; 209,7 при 1100 мин$^{-1}$	128,3/38,0
Среднее		**249,18**	**88,83/26,3**

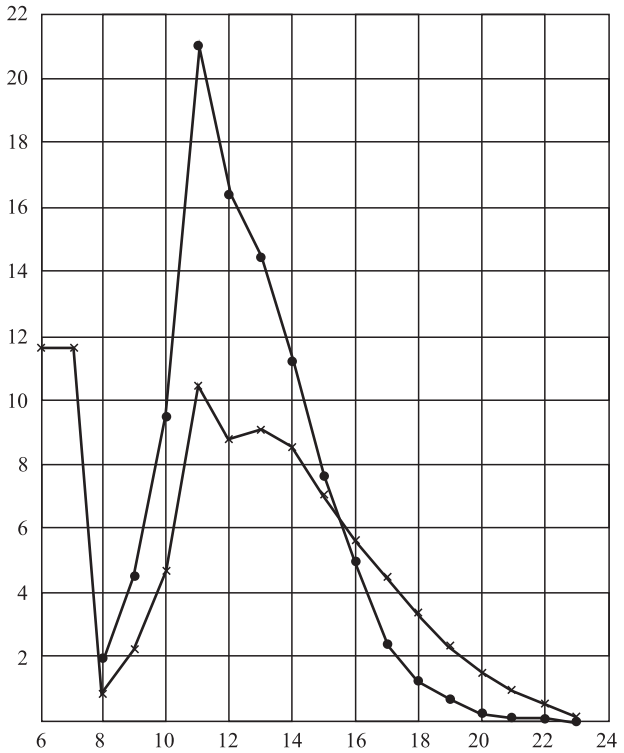


Рис. 2. Модификация дизельного топлива компании "Лукойл". Данные двух хроматограмм проб топлива № 1169 и № 1171 от 16.03.2011 г. с хроматографа Кристаллюкс-4000М (детектор ПИД-ПДФ) в аккредитованной Тамбовской лаборатории судебной экспертизы: резко уменьшилось содержание фракций $C_{11}H_{24}$—$C_{14}H_{30}$, но образовалось 23 % фракций C_6H_{14}, C_7H_{16}

По многим хроматограммам, как и по данным табл. 3, выявлено, что активация бензина уменьшает содержание тяжелых фракций и увеличивает — легких. Однако октановое число активированного бензина подлежит моторному контролю.

Ранее в кавитации и гомогенизации ставили цель лишь разрушения кластеров топлив. Не было достоверных представлений о ходе модификации топлив, считалось причиной уменьшения их расхода в ДВС — только облегчение фракционного состава (табл. 4).

Каковы же физические причины существенного повышения активатором по патенту РФ № 2411074 теплоты сгорания углеводородных моторных топлив?

Примем во внимание, что для сжигания топливо должно быть подогрето, избавлено от негорючих примесей и диспергировано (испарено) до молекул. Эти процессы, по-видимому, значительно облегчены в активаторе.

Далее, при прогреве должно пройти дробление углеродной цепи молекул, отделение атомов водорода, полное разделение между атомами углерода. Параллельно должна идти диссоциация молекул кислорода. Лишь после этого происходит соединение атомов топлива с атомами кислорода.

В итоге, если диссоциацию молекул топлива и кислорода проводить заранее, то теплота горения не будет затрачиваться на подготовку топлива и его теплотворная способность будет больше, чем

Таблица 2

Изменение химмотологических показателей дизельного топлива Л-0,05-62 ГОСТ 305—82 по данным протокола испытаний № 944 от 29.03.2010 г. в аккредитованной лаборатории ООО "Тамбов-Терминал" (аттестат № РОСС RV.0001.22НХ75, срок действия до 24.04.2011 г.)

№ в табл. ГОСТ 305	Показатели	Норма по ГОСТ 305	НТД на метод контроля	Результаты испытаний топлива	
				исходн.	активир.
2	Фракционный состав топлива Л-0,05-62: 50 % перегоняется при температуре, °С, не выше	280	По ГОСТ ISO 3405, ГОСТ 2177 (метод А)	264	263
	95 % перегоняется при температуре, °С, не выше	360		341	351
4	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С, не ниже	40	ГОСТ ISO 2719, ГОСТ 6356	64	78,5
5	Массовая доля серы, % не более	0,2	ГОСТ 19121	0,032	0,015
		0,05	По ГОСТ ISO 20846, ГОСТ 51947		
12	Концентрация фактических смол, мг/100 см^3	40	ГОСТ 5759	7,4	0,8
16	Плотность при 20 °С, кг/м^3	863,4	ГОСТ 3900	830,7	828,6

Таблица 3

Результаты фракционной разгонки активированного автомобильного бензина: протокол испытаний № 3665 от 24.11.2005 г. в аккредитованной лаборатории "ООО Тамбов-Терминал"

Показатели	Норма по НД	НД на метод	Результаты испытаний
Фракционный состав:			
температура начала перегонки, °С, не ниже	35		47
10 % бензина перегоняется при температуре °С, не выше	70		59
50 % бензина перегоняется при температуре °С, не выше	115		90
90 % бензина перегоняется при температуре °С, не выше	180	ГОСТ 21779—99	150
Конец кипения бензина, °С, не выше	195		193
Остаток в колбе, %, не более	1,5		1,5
Остаток и потери, %, не более	4,0		1,5

Таблица 4

Преобразования молекул углеводородов под влиянием электромагнитного и трибохимического воздействий по данным [1]

Исходная фракция, теплота сгорания Q, кДж/моль	Состав фракций		Конечные фракции	Суммарная теплота сгорания преобразованного топлива Q, кДж/моль	Положительный эффект, %
	1-я фаза	2-я фаза			
C_8H_{18} $Q = 5470$	C_4H_8	$2C_2H_4$	$2C_2H_4$	$Q = 5607$	2,5
	C_4H_{10}	$\longrightarrow$	C4H10		
C_8H_{18} $Q = 5470$	C_2H_2	$\longrightarrow$	C_2H_2	$Q = 5900$	7,86
	$2C_2H_4$	$\longrightarrow$	$2C_2H_4$		
	$2CH_4$	$\longrightarrow$	$2CH_4$		
C_8H_{18} $Q = 5470$	C_5H_6	$0,5\ C_2H_4$	$0,5\ C_2H_4$	$Q = 5975$	9,23
		$2C_2H_4$	$2C_2H_4$		
	$3CH_4$	$\longrightarrow$	$3CH_4$		
C_8H_{18} $Q = 5470$	$2C_2H_2$	$2C_2H_2$	$2C_2H_2$	$Q = 7001$	28
	$0,5C_2H_4$	$0,5C_2H_3$	$0,5C_2H_3$		
		0,5H	0,5H		
	$3CH_4$	$3CH_3$	$3CH_3$		

определяемая в калориметрической бомбе. Это может быть одной из причин повышения активатором теплоты сгорания топлив, что частично подтверждается, например, повышенной, в сравнении с жидкими нефтепродуктами, теплотворностью нефтяных газов (как бы диспергированных углеводородов), где нет необходимости дробления кластеров.

Основанием к механическому разрушению углеводородов является механохимия, выявленная еще в 1887 г. Показано, что даже там, где связи требуют высоких затрат энергии, возможны разрывы молекулярных цепей магнитными полями и механическими напряжениями свыше предела прочности атомных связей [12]. По классическому механизму термического разложения углеводородов на начальных его стадиях рвутся связи с наименьшей энергией разрыва 295...431 кДж/моль, а прочные связи требуют до 502,4 кДж/моль. При этом на разложение углеводородов влияют катализаторы, например, медь, цинк.

Механохимия деструктирует как отдельные фракции нефти, так и смеси с образованием низкомолекулярных гомологов, а также водорода и углерода с осаждением серы. Деструкция насыщенных углеводородов происходит через разрыв цепей, а непредельные разрушаются через образование насыщенных продуктов, возможно гидрирование их продуктами деструкции исходного вещества [12]. Следствием механохимии является радикализация моторных топлив, неясные продолжительные химические реакции, не текущие в обычных условиях, дробление тяжелых компонентов, создание новых легких веществ, разрушение смол и сернистых соединений, что проявляется с выделением тепла. Так в гептане разрушение ковалентных связей в его цепях высвобождает около 419 кДж/моль [12].

Но проф. Ахматовым А. С. [12] показано, что при разрыве цепей углеводородов кроме свободных валентностей атомов углерода, образуются и свободные радикалы, например, $R—CH_2^-$ (рис. 3) с высокой реакционной способностью.

Если механохимией подвергают смеси, то могут возникать новые химические соединения, гетерогенные цепи, построенные из продуктов разрыва. Например [12], образующиеся на

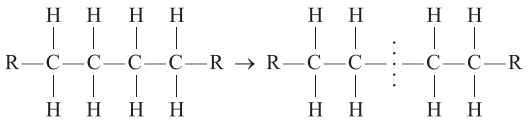


Рис. 3. Разрыв связей, образование ненасыщенных валентностей атомов углерода и свободных радикалов

метиленовой группе свободные радикалы могут присоединять кислород (из жидкости) и создавать взрывные перекиси: $R—CH_2—O—O—$ [12].

Короткоживущие (до 0,1 с) алкильные $\left(CH_3^-\right)$ и арильные $\left(CH_3CH_2^-\right)$ радикалы и перекиси действуют на среду с высокими скоростями рекомбинаций, присоединения и диспропорционирования [12]. Но в механохимии углеводородов образуется и значительное количество долгоживущих (от нескольких минут до нескольких месяцев и даже лет) свободных радикалов. При механохимии топлив возможно образование в качестве би-радикалов молекул кислорода, которые всегда в малом количестве имеются в моторных топливах. Возможно образование и поли-радикалов с более двумя не спаренными электронами.

Особенности механохимии в активаторе подтверждены тем, что под влиянием долгоживущих радикалов модификация топлив продолжается и за активатором. И ввод небольшой доли топлива из активатора в не активированное заметно повышает в смеси долю активированного:

— в товарное топливо вводили 20 % активированного с 23 % легких фракций (т. е. 4,6 %) и через 15 мин в смеси образовывалось 12 % легких фракций;

— аналогично после ввода 30 % активированного (т. е. 6,9 % легких фракций) через 15 мин в смеси создавалось 39 % легких фракций;

— но после ввода 40 % активированного (т. е. 9,2 % легких фракций), через 15 мин выявлено лишь 27 % легких фракций;

— а после ввода 50 % активированного топлива через 15 мин в смеси выявлено легких фракций еще меньше.

Таким образом, разрыв высокоэнергетических связей в молекулах углеводородов с образованием коротко- и долгоживущих радикалов уменьшает затраты тепла сгорания на расщепление молекул на атомы. И чем длиннее углеводородная цепь, тем ощутимее может быть диспергирование [12] с высвобождением энергии связей в цепях (табл. 5). А проф. Ф. М. Канаревым подчеркнуто [13], что чем больше актов воздействия механохимии на вещество, тем глубже его модификация. Поэтому разработан активатор и с четырьмя камерами (патент РФ № 2550203).

Как видно из табл. 5, с удлинением цепи углеводородов на образование связей между атомами углерода затраты энергии растут значительно, а механо-химией она может быть выделена.

Каковы же физические механизмы существенного повышения теплоты сгорания акти-

Таблица 5

Показатели энергии связей между атомами углерода в молекулах углеводородов

№	Вещество	Теплота сгорания		Энергия связи между атомами углерода, кДж/моль
		кДж/моль	кДж/г	
1	2	3	4	7
1	Графит	393,680	394,1	—
2	Водород	286,020	123,01	—
3	Метан	890,930	55,73	—
4	Этан	1560,88	51,92	220,98
5	Пропан	2220,30	50,37	441,96
6	Бутан	2880,26	49,61	662,94
7	Пентан	3511,50	48,73	883,72
8	Гексан	4165,82	48,40	1104,9
9	Гептан	4820,39	48,19	1325,88
10	Октан	5474,41	47,97	1546,86
11	Декан	6783,16	47,72	1988,82

вированных топлив? Здесь можно опереться на современную, глубоко обоснованную физхимию проф. Ф. М. Канарева [13]. Им показано, что для разрушения связей между валентными электронами атомов в цепи достаточно затратить 2,56 *eV* механической энергии, а для термического разрыва энергии требуется в 2 раза больше — 5,13 *eV*, так как каждый обособившийся электрон для своей стабильности должен получить по тепловому фотону энергией 2,56 *eV*. Поэтому после механического разделения валентные электроны вместо тепловых поглощают по эфирному фотону из физического вакуума общей энергией в 5,13 *eV*. Поглотив по эфирному фотону, валентные электроны становятся полноценными, активными, могут восстановить свою разорванную связь и соединить части разорванных молекул. Но, соединяясь, электроны излучают поглощенные из эфира фотоны и энергонасыщают вещество той же энергией 5,13 *eV*.

Таким образом, затратив в механохимии 2,56 *eV* механической энергии, при восстановлении электронами их связи насыщают вещество энергией двух тепловых фотонов 5,13 *eV* или 248 кДж/моль. При разрыве же электронных связей между несколькими атомами углеводородной цепи дополнительной энергии в вещество может выделяться больше.

Для подтверждения наличия в эфире его частиц — носителей энергии Ф. М. Канаревым [13] определена его характеристика: эфир имеет линейную структуру, управляемую константой:

$$k_0 = mr = 2{,}210254 \cdot 10^{42} \text{ кгм} = \text{const}.$$

Из изложенного, как представлено в [13], дробление механохимией углеводородов на обрывки молекул с обратимым действием валентных электронов может быть главной причиной повышения теплотворной способности (см. табл. 4) и уменьшения расхода топлива в ДВС.

Возможно, что описанные процессы могут происходить и при разрыве кластеров молекул, связей между атомами водорода и углерода. А если связи разрушать резонансным магнитодинамическим способом [13], то будет возможно углубить модификацию топлив, еще более повысив их теплотворную способность. Подтверждением этому может служить достигнутый в водо-электролитических ячейках проф. Ф. М. Канарева коэффициент теплоотдачи величиной 29 000 [13].

Можно также предположить, что повышение теплотворной способности топлив обусловлено и тем, что активные радикалы в топливе, находясь в возбужденном состоянии, также могут поглощать фотоны эфира и становиться более энергонасыщенными. Отсюда эффективность активатора может зависеть от материала корпуса активатора, который должен быть прозрачен инфракрасным фотонам, которые могут резонансно поглощаться компонентами углеводородов.

Стандартно теплоту сгорания определяют в калориметрической бомбе, где отсутствуют какие-либо воздействия на топливо, а активаторы обусловливают воздействие на топливо окружающей среды. Отсюда понятно, как механохимические процессы в воде, газах позволяют получать дополнительную энергию из окружающего пространства. Так, на основе трубки Ранке-Хильша только в РФ выпускается более 30 аппаратов водяного отопления, в которых тепловая энергия в 1,1—10 раз превышает энергию на привод водяного насоса этих отопителей.

Однако для сжигания топлив проф. Ф. М. Канарев высказывает другое: "Все эффекты, свя-

занные с повышением давления сгорания топлив в закрытых полостях, формируются не газами, а фотонами. А объемы световых фотонов, излучаемых электронами в реакциях предварительно диссоциированных молекул, в 100 000 раз больше объемов их источников — электронов, а попутно излучаемые невидимые инфракрасные фотоны в 10, 20—100 раз больше объема световых фотонов" [13]. Отсюда предположим, что уменьшение расхода моторных топлив обусловлено как их преобразованиями в активаторе, так и процессами в камерах сгорания ДВС.

В целом, активатор, осуществляя механохимическое воздействие на углеводороды топлив, уменьшает их расход в ДВС и как показано испытаниями — без уменьшения их эффективной мощности. Но стабильное и высокоэффективное такое воздействие впервые реализовано только в активаторе по патенту № 2411074.

Активированное дизельное топливо уменьшает и дымность дизелей. Так на автобусе НефАЗ-5299-30-33 (гос. номер М584ТУ8, дизель КАМАЗ-740.65-240) дымность ОГ в режиме свободного ускорения по прибору МЕТА-01 МП 0.1 в порядке, рекомендованном инструкцией по его применению на пункте технического осмотра (г. Тамбов, № в реестре операторов техосмотра N 00255) составила 3,5 $м^{-1}$(77,8 % по вспомогательной шкале), а с установленным активатором — 2,7 $м^{-1}$ (68,7 %).

Проверка низкотемпературных свойств активированных топлив проведена в ФБУ "Тамбовский ЦСМ" с дизельным топливом Л-0,05-62 ГОСТ 305—82 компании Роснефть в климатической камере КХТВ-0,08. Выявлено, что товарное не активированное топливо при температуре минус 30 °С полностью потеряло текучесть, а активированное сохранило текучесть при минус 45 °С без признаков образования кластеров.

Активация топлив снижает температуру и период задержки воспламенения топлив, повышает полноту сгорания. Это подтверждается более мягкой работой ДВС, обеспечением их работы с увеличенным углом опережения зажигания/впрыска, так как новые компоненты топлива воспламеняются при меньшей температуре и рассредоточено во времени.

Созданный активатор с необратимостью активации позволяет существенно уменьшить расход топлив автотракторных, транспортных, авиационных и жидкостно-реактивных двигателей, может найти применение в производстве моторных топлив по нормам Евро 3 и Евро 4 мало затратными приемами механохимии. Причем разные по качеству исходные нефтепродукты доводятся до близких физико-химических показателей с выделением из дизельного топлива и осаждением в активаторе серы, а также с разрушением смолистых соединений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Разработка** научных основ технологии получения альтернативных видов топлив для технических средств железнодорожного транспорта: отчет РФФИ 12-08-13106-офи_м_РЖД рег. № 01201276764. — М.: НЦ НВМТ РАН, 2012—2013 г.
2. **Голиков Ю. И.** История одного изобретения // ТехноМИР. — 2001. — № 2 (8). — С. 38—39.
3. **Пат. 25228 (UA).** "Магнитный активатор".
4. **Подготовка** к сжиганию и сжигание местного сырья (сырой нефти) в паровом котле ДКВР-10/12 / В. И. Кормилицын, В. Н. Фомин, Е. Б. Малюкова, А. П. Бобылев, Т. Б. Шаталова, А. П. Аверьянов, Н. Б. Юшков // Химическая технология. — 2013. — Т. 4. — № 11. — С. 679—681.
5. **Пат. 2435649 (РФ).** "Топливный Кавитатор" (сайт http//cavitron.ru).
6. **Пат. 34142 (UA).** "Способ приготовления углеводородного топлива и устройство для его осуществления".
7. **Грумондз В. Т.** Нанотехнологии обработки углеводородных жидкостей, основанные на использовании физико-химических явлений, происходящих на границах фаз и при фазовых переходах в условиях пузырьковой кавитации // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — 2011. — № 4 (5). — С. 2120—2122.
8. **Микипорис Ю. А.** Улучшение экологических показателей автомобильных двигателей электромагнитной обработкой топлива: учебное пособие. — Ковров: КГТА, 2008. — 168 с.
9. **Воробьев Ю. В.** Основы теории механоактивации жидких сред // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2013. — Т. 19. — № 3. — С. 608—613.
10. **Воробьев Ю. В., Килимник А. Б., Дунаев А. В.** Снижение расхода топлива автотракторными ДВС приемами механохимии // Автомобильная промышленность. — 2015. — № 10. — С. 21—22.
11. **Днепровский К. С.** Механохимические превращения углеводородов нефти: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. 02.00.13. — Томск: ИХН СО РАН, 2003. — 24 с.
12. **Ахматов А. С.** Молекулярная физика граничного трения. — М.: Физматгиз, 1963. — 472 с.
13. **Канарев Ф. М.** Начала физхимии микромира. 8-е изд. — Краснодар: КубГАУ, 2007. — 753 с. (www.micro-world.su/index.php/2012-03).

УДК 621.89.017

В. Ю. Щицын, канд. техн. наук, доцент**, А. В. Пыдрин,** канд. техн. наук, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, **А. Б. Лагузин,** аспирант, ГНЦ РФ ФГУП "НАМИ",
А. А. Волков, аспирант ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева
E-mail: avtokon93@yandex.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СВОЙСТВ ОТРАБОТАВШИХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРИСАДОК

В статье рассмотрено влияние полифункциональных присадок на вязкостно-температурные свойства моторных масел. Экспериментально доказана возможность восстановления свойств моторных масел в процессе эксплуатации при неправильном функционировании силовой установки.

Ключевые слова: *моторное масло, двигатель, вязкость, поверхностно-активные вещества.*

The article considers the influence of polyfunctional additives on the viscosity-temperature properties of motor oils. Experimentally proved the possibility of restoring the properties of motor oils during operation with improper operation of the power plant.

Keywords: *engine oil, engine, viscosity, surface-active substances.*

К числу важных эксплуатационных свойств моторных масел относятся их вязкостно-температурные свойства. Вязкость моторного масла является важнейшим показателем, характеризующим процесс смазывания, распределение масла по поверхности трения, а также в значительной степени влияющим на потери энергии на трение в двигателе [1, 2]. Следует уточнить, что под вязкостью в данной работе понимается кинематическая вязкость жидкости.

Вязкость зависит от многих параметров, таких как химический состав, температура, давление, и многие другие. Известно, что в процессе эксплуатации вязкость масла может значительно изменяться. При исправной работе двигателя при наработке масла вязкость увеличивается вследствие накопления в масле различного вида отложений, таких как смолы, лаковые отложения, нагар. В основе процесса образования отложений лежат реакции окисления и дальнейшего превращения продуктов окисления [3—5].

Целью представленного исследования было определение влияния многофункциональных присадок Телаз-ЛС и АКОР-1 на реологические свойства исследуемого моторного масла.

Определение вязкости масел проводилось в соответствии с ГОСТ 33—2000 (ISO 3104—94). Сущность метода заключается в измерении с помощью калиброванного стеклянного вискозиметра времени истечения (с), определенного объема испытуемой жидкости под влиянием силы тяжести при постоянной температуре [8].

Для измерения вязкости проба масла помещается в капиллярный вискозиметр марки ВПЖ-1 с диаметром капилляра 1,52 мм, затем вискозиметр погружается в жидкостный переливной термостат, который предварительно заполнен водой.

Для исследований были отобраны пробы масла из дизельного двигателя Perkins 1004-40T. В данном двигателе используется моторное масло Mannol TS-5. Цикл технического обслуживания данного двигателя составляет 250 мото-ч, поэтому образцы масла были отобраны при наработке 90 и 250 мото-ч, а также были взяты образцы свежего не отработавшего масла в качестве контрольных [9, 10].

Было выявлено, что вязкость масла в данном двигателе уменьшается. Это может происходить по нескольким причинам.

1. Выработка вязкостной присадки в масле, отвечающей за создание благоприятных вязкостно-температурных свойств. Однако работы [6, 7] показывают, что подобные присадки, в частности присадки на основе полиметакрилата (Lubrizol 3135, TLA 227, TAD 904) и полиизобутилена (Lubrizol 3174) не вырабатываются в маслах за указанный период 250 мото-ч.

2. Попадание в моторное масло дизельного топлива и его разжижение. Это достаточно распространенный дефект дизельных двигателей, который может быть вызван достаточно большим количеством причин. Таких, как частичный выход из строя топливного насоса высокого давления (если двигатель и топливная аппаратура имеют общую систему смазки), особенно ввиду износа плунжерных пар, неправильная работа системы впрыска топлива и др.

Таким образом, было установлено, что причиной уменьшения вязкости является попадание дизельного топлива в масло. Для устранения получившегося дефекта моторного масла были проведены испыта-

Кинематическая вязкость масла Mannol TS-5 при различном времени наработки и при добавлении составов Телаз-ЛС и АКОР-1 при температуре 50 °С

Присадка	Вязкость составов, м^2/с		
	Масло Mannol чистое	Масло Mannol с наработкой 90 мото-ч	Масло Mannol с наработкой 250 мото-ч
Без присадки	105,3	91,1	87,1
10 % Телаз-ЛС	110,6	120,7	128,9
10 % АКОР-1	109,2	77,6	104,5

ния по восстановлению его реологических свойств путем добавления полифункциональных присадок. Были использованы составы Телаз-ЛС и АКОР-1. Полученные данные представлены в таблице.

Также были проведены испытания по определению вязкости для температур 20 и 70 °С. Результаты представлены в виде графиков на рис. 1—3.

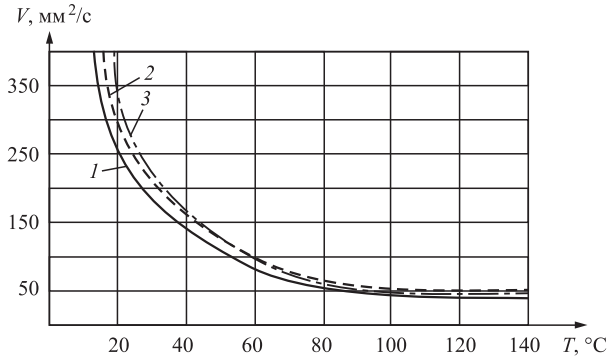


Рис.1. Кинематическая вязкость смазочных композиций на основе чистого масла Mannol TS-5:

1 — масло без присадок; *2* — масло с ингибитором Телаз-ЛС; *3* — масло с ингибитором АКОР-1

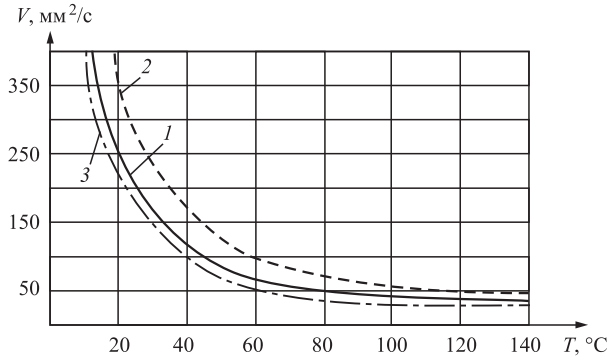


Рис. 2. Кинематическая вязкость смазочных композиций на основе чистого масла Mannol TS-5, отработавшего 90 мото-ч:

1 — масло без присадок; *2* — масло с ингибитором Телаз-ЛС; *3* — масло с ингибитором АКОР-1

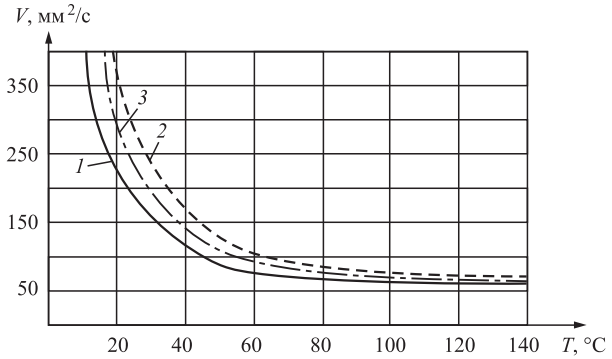


Рис. 3. Кинематическая вязкость смазочных композиций на основе чистого масла Mannol TS-5, отработавшего 250 мото-ч:

1 — масло без присадок; *2* — масло с ингибитором Телаз-ЛС; *3* — масло с ингибитором АКОР-1

Полученные данные показывают, что примененные составы могут применяться для восстановления вязкостно-температурных свойств моторных масел при неисправной работе двигателя в том случае, если немедленный ремонт двигателя невозможен, либо для восстановления свойств масла без его замены после ремонта двигателя, имеющего подобные неисправности. Также экспериментальные данные показывают, что более высокой способностью к восстановлению вязкостно-температурных свойств обладает состав Телаз-ЛС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гайдар С. М.** Применение нанотехнологий для повышения надежности машин и механизмов // Грузовик. — 2010. — № 10. — С. 17—38.
2. **Карелина М. Ю., Гайдар С. М.** Исследование эффективности триботехнических препаратов на основе наноматериалов // Грузовик. — 2015. — № 4. — С. 17—29.
3. **Подходы** к определению технического состояния транспортных средств / С. М. Гайдар, Ю. А. Заяц, Т. М. Заяц, А. О. Власов // Грузовик. — 2015. — № 5. — С. 27—30.
4. **Биотоплива** для двигателей внутреннего сгорания / В. А. Марков, С. Н. Девянин, С. А. Зыков, С. М. Гайдар. — М., 2016.
5. **Улучшение** эксплуатационных характеристик двигателя с применением нанотехнологий / С. М. Гайдар, В. Н. Свечников, А. Ю. Усманов, М. И. Иванов // Труды ГОСНИТИ. — 2013. — Т. 111. — № 1. — С. 4—8.
6. **Гайдар С. М., Кононенко А. С.** Ингибированные составы для хранения сельскохозяйственной техники // Техника в сельском хозяйстве. — 2011. — № 3. — С. 21—22.
7. **Гайдар С. М.** Защита сельскохозяйственной техники от коррозии и износа с применением нанотехнологий: Дисс. ... д-ра техн. наук. Московский государственный агроинженерный университет. Москва, 2011.
8. **Гайдар С. М.** Этаноламиды карбоновых кислот как полифункциональные ингибиторы окисления углеводородов // Химия и технология топлив и масел. — 2010. — № 6. — С. 16—20.
9. **Гайдар С. М.** Планирование и анализ эксперимента: учебник. — М.: Изд-во ФГБНУ "Росинформагротех", 2015. — 548 с.
10. **Gaidar S. M.** Carboxylic acid ethanolamides as polyfunctional hydrocarbon oxidation inhibitors // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. — 2011. — Т. 46. — № 6. — С. 385—391.

УДК 621.436, 629.424, 621.45

В. А. Марков, д-р техн. наук, профессор, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru,
Ф. Б. Барченко, канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н. Э. Баумана, e-mail: barchenco@mail.ru,
Е. Ф. Поздняков, канд. техн. наук, ген. дир. ЗАО "Форант-сервис", г. Ногинск Московской обл., e-mail: pef07@mail.ru, **А. Ю. Епишин,** старший преподаватель, Российская открытая академия транспорта (МИИТ), e-mail: auep2014@yandex.ru, **С. В. Плахов,** зам. ген. дир., гл. программист, ООО "ППП Дизельавтоматика", г. Саратов, e-mail: dizavt@owerta.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ. ЧАСТЬ 3

Разработана математическая модель системы автоматического регулирования дизеля с регуляторами различных типов. Проведены расчеты переходных процессов дизеля с этими регуляторами. Показана возможность улучшения динамических свойств системы автоматического регулирования частоты вращения дизеля промышленного транспортного средства при ее оснащении регулятором с корректирующими звеньями.

Ключевые слова: *дизель-генераторная установка, дизельный двигатель, система автоматического регулирования, топливная экономичность, переходный процесс, тепловоз.*

A mathematical model of the automatic control system for a locomotive diesel engine with regulators of various types is developed. Calculations of transient processes for the diesel engine with these regulators are conducted. An opportunity of improving of the automatic control system dynamic properties of the locomotive diesel engine when it is equipped with a regulator with corrective links is shown.

Keywords: *diesel generator set, diesel engine, automatic control system, fuel efficiency, transient process locomotive.*

Полученное математическое описание элементов комбинированного двигателя Д49 дополнено математической моделью автоматического регулятора. Рассмотрен электронный регулятор частоты вращения коленчатого вала дизеля. Он содержит датчик частоты вращения (ДЧВ), электронный блок управления (ЭБУ) и исполнительный механизм (ИМ), воздействующий на орган управления топливоподачей дизеля — рейку ТНВД (рис. 6, *а*) [2]. Каждый из входящих в структуру этого регулятора элементов описывается алгебраическими или дифференциальными уравнениями.

Датчики режимных параметров электронных регуляторов (в частности, датчик частоты вращения $\omega_д$ или φ индукционного типа) обычно обладают дискретностью в съеме сигнала с периодом, обычно не превышающем $\Delta t_з = 0{,}003...0{,}005$ с. Если пренебречь задержкой прохождения сигнала, то такой датчик может быть описан алгебраическим уравнением вида:

$$U_\varphi = k_\varphi \varphi, \qquad (67)$$

где U_φ — выходной сигнал датчика; k_φ — коэффициент усиления датчика. Тогда его передаточная функция определяется из выражения:

$$W_{дчв}(p) = k_\varphi, \qquad (68)$$

соответствующего идеальному усилительному звену (рис. 6, *б*).

Как отмечено выше, распространенным типом регуляторов дизелей являются ПИД-регуляторы. В САР с такими регуляторами измеряется не только отклонение частоты вращения $\varphi = \Delta\omega_д/\omega_{до}$ от заданного режима $\omega_{до}$, но и производную от изменения этого отклонения $d\varphi/dt$ и накопление ошибки в виде интеграла $\int\varphi dt$. Таким образом, формируется ПИД-закон регулирования в виде (рис. 6, *б*):

$$U_{упр} = k_п U_\varphi + k_и \int U_\varphi dt + k_д d\,U_\varphi/dt, \qquad (69)$$

где $U_{упр}$ — выходной сигнал вычислительного устройства; $k_п$, $k_и$, $k_д$ — коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих закона регулирования.

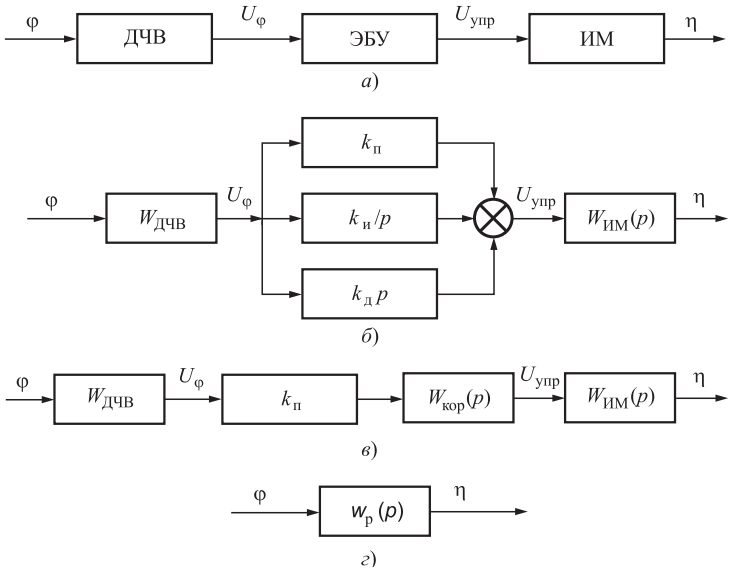


Рис. 6. Функциональная схема электронного регулятора частоты вращения дизеля (*а*), структурная схема электронного регулятора с ПИД-законом регулирования (*б*), структурная схема электронного регулятора с последовательно включенными корректирующими звеньями (*в*), свернутая структурная схема регулятора частоты вращения дизеля (*г*)

Однако в системах регулирования, устанавливаемых на дизель-генераторные установки, возможно использование П-регуляторов с последовательно включенными корректирующими звеньями. В этом случае базовым регулятором является традиционный П-регулятор с передаточной функцией:

$$W_п(p) = k_п \qquad (70)$$

с большим коэффициентом усиления $k_п$, а требуемые показатели качества регулирования достигаются с помощью последовательно включенных в структурную схему САР корректирующих звеньев с общей передаточной функцией $W_{кор}(p)$ (рис. 6, *в*). В качестве последовательно включенных корректирующих звеньев могут быть использованы различные типовые звенья — форсирующее (см. рис. 2), интегро-дифференцирующие (см. рис. 3) и др. Одним из недостатков САР, реализующих пропорциональный принцип регулирования, является сравнительно невысокое быстродействие системы регулирования. Поэтому в проведенных ниже исследованиях в качестве последовательно включенного корректирующего звена рассмотрено форсирующее звено, позволяющее форсировать переходный процесс в ДГУ в начальной его фазе и, тем самым, значительно повысить быстродействие САР. При этом использовано форсирующее звено с передаточной функцией:

$$W_{кор}(p) = W_ф(p) = T_ф p + 1, \qquad (71)$$

где $T_ф$ — постоянная времени форсирующего звена.

В цифровом вычислительном устройстве электронного блока алгоритм управления реализуется в виде программы, состоящей из отдельных элементарных операций (команд). Команды выполняются микропроцессором дискретно во времени, и на формирование управляющего сигнала необходимо определенное время, зависящее от объема программы управления. Время выполнения программы обычно не превышает $\Delta t_з = 0{,}01$ с, поэтому при дальнейших исследованиях эта задержка не учитывалась.

В качестве исполнительных механизмов (ИМ) электронных регуляторов чаще используются электромагнитный или электрогидравлический ИУ, перемещающие дозирующий орган системы топливоподачи на величину $\eta = \Delta h_р/h_{ро}$. Они могут быть описаны уравнением

$$T_{им}(d\eta/dt) + \eta = k_{им}\, U_{упр} \qquad (72)$$

или передаточной функцией

$$W_{им}(p) = \frac{k_{им}}{T_{им}p + 1}, \qquad (73)$$

соответствующей апериодическому звену первого порядка (см. рис. 6, *б*, *в*). Далее рассмотрен электрогидравлический ИМ, воздействующий на рейку ТНВД и имеющий коэффициент усиления $k_{им} = 1$ и постоянную времени $T_{им} = 0{,}06$ с.

Развернутая структурная схема регулятора с последовательно включенным форсирующим корректирующим звеном (рис. 6, *в*) может быть представлена в виде свернутой структурной схемы такого регулятора (рис. 6, *г*). Тогда с учетом структурных схем объекта регулирования (см. рис. 5, *б*) и регулятора с последовательно включенным корректирующим форсирующим звеном (см. рис. 6, *г*) свернутая структурная схема САР может быть представлена в виде, показанном на рис. 7, а соответствующая ей развернутая схема — на рис. 8.

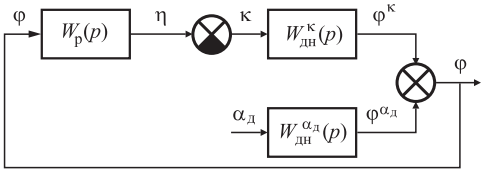


Рис. 7. Свернутая структурная схема САР частоты вращения дизеля с турбонаддувом и регулятором частоты вращения

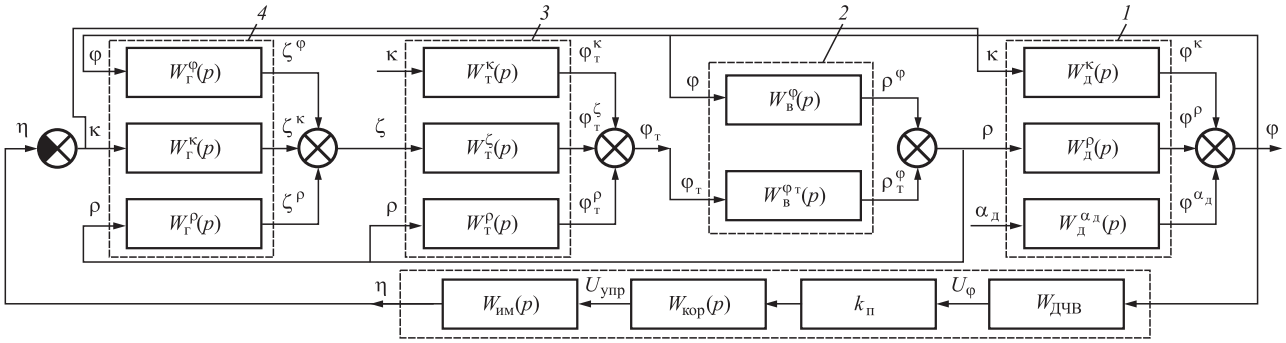


Рис. 8. Развернутая структурная схема САР дизеля с турбонаддувом и регулятором частоты вращения с последовательно включенным корректирующим звеном:

1 — собственно двигатель; *2* — впускной трубопровод; *3* — турбокомпрессор; *4* — выпускной трубопровод; *5* — регулятор частоты вращения

Разработанная математическая модель, включающая представленные выше математические модели объекта регулирования — дизеля с турбонаддувом и регулятора с последовательно включенным форсирующим корректирующим звеном, использована для проведения исследований САР частоты вращения дизеля Д49. Эти исследования включают расчет наиболее характерных для дизелей ДГУ переходных процессов наброса нагрузки, разработку методики выбора параметров регулятора частоты вращения с последовательно включенными корректирующими звеньями и разработку методики оценки устойчивости САР частоты вращения дизеля ДГУ, оснащенной регулятором с последовательно включенными корректирующими звеньями.

На первом этапе исследований оценивалось влияние основных параметров регулятора частоты вращения дизеля ДГУ с последовательно включенным форсирующим корректирующим звеном на характер протекания переходного процесса наброса нагрузки. При этом использованы разработанные математические модели объекта регулирования и регулятора частоты вращения. При этом оценивалось влияние двух параметров регулятора с последовательно включенным корректирующим звеном — коэффициента усиления $k_п$ П-регулятора с передаточной функцией (70) и постоянной времени $T_ф$ форсирующего корректирующего звена с передаточной функцией (71). Оптимизация параметров исследуемого регулятора путем непосредственного расчета переходного процесса наброса нагрузки на дизель ДГУ возможна лишь при ограниченном сочетании значений коэффициентов $k_п$ и $T_ф$ исследуемого регулятора. Поэтому определенный интерес представляет разработка методики выбора значений коэффициентов $k_п$ и $T_ф$ и оценка их влияния на показатели качества процесса регулирования.

Предлагаемая методика построена с использованием методов параметрической оптимизации САР и предусматривает использование программного комплекса (ПК) "Моделирование в технических устройствах (МВТУ)", разработанного под руководством канд. техн. наук, доцента О. С. Козлова [14, 15]. САР со структурной схемой на рис. 8 смоделирована в среде ПК "МВТУ" (рис. 9).

В схеме на рис. 9 датчик 7 частоты вращения моделируется с помощью апериодического звена первого порядка с передаточной функцией $W_{дчв}(p) = k_{дчв}/(T_{дчв}p + 1)$, в которой постоянная времени $T_{дчв}$ принята близкой к нулю (в ПК "МВТУ" константы передаточных функций типовых блоков не могут быть равными нулю). Базовый П-регулятор смоделирован с использованием идеального усилительного звена *8* с передаточной функцией $W_п(p) = k_п$. В библиотеке типовых блоков ПК "МВТУ" отсутствует блок с передаточной функцией $W_{кор}(p) = T_ф p + 1$, соответствующей форсирующему звену. Поэтому для моделирования последовательно включенного корректирующего форсирующего звена использован блок *9* с более общей передаточной функцией $W_{кор}(p) = (T_{кор1}p + 1)/(T_{кор2}p + 1)$, в которой постоянная времени $T_{кор2}$ близка к нулю, а постоянная времени $T_{кор1} = T_ф$. Исполнительный механизм *10* моделируется с помощью апериодического звена первого порядка с передаточной функцией $W_{им}(p) = k_{им}/(T_{им}p + 1)$, в которой коэффициент усиления $k_{им}$ принят равным единице, а постоянная времени $T_{дчв} = 0{,}06$ с.

При моделировании рассмотрен переходный процесс наброса нагрузки на дизель, вызванный изменением настройки потребителя $\alpha_д = \Delta N/N_о$

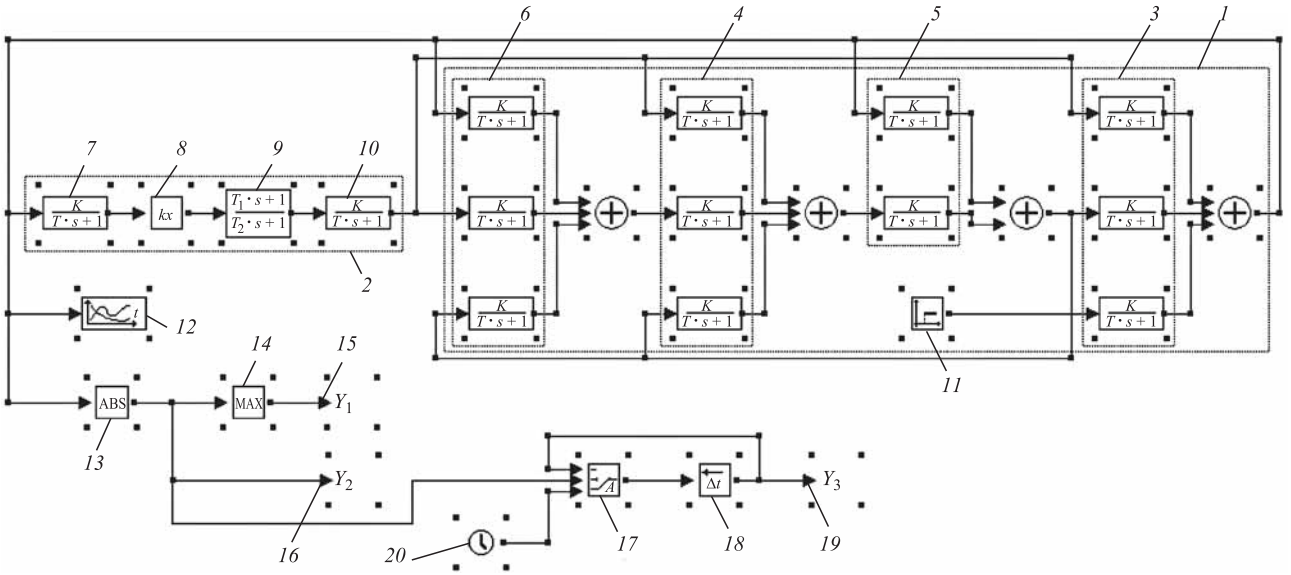


Рис. 9. Схема моделирования САР с блоками, формирующими критерии оптимальности, построенная в среде ПК "МВТУ":

1 — объект регулирования (дизель Д49); *2* — регулятор; *3* — собственно двигатель (поршневая часть); *4* — турбокомпрессор; *5* — впускной трубопровод; *6* — выпускной трубопровод; *7* — датчик частоты вращения; *8* — базовый П-регулятор; *9* — последовательно включенное корректирующее форсирующее звено; *10* — ИМ

в уравнении (6) объекта регулирования. Такое единичное ступенчатое воздействие на ОР подавалось от блока *11*. Для наблюдения переходного процесса в САР в схему моделирования введен блок *12* ("временной график"). Перед проведением параметрической оптимизации САР было исследовано влияние коэффициента усиления $k_п$ базового П-регулятора. При этом корректирующее форсирующее звено *9* было выключено из схемы моделирования путем задания постоянной времени $T_{кор1} = T_ф$ примерно равной нулю в общей передаточной функции $W_{кор}(p) = (T_{кор1}p + 1)/(T_{кор2}p + 1)$, в которой постоянная времени $T_{кор2}$ также близка к нулю.

Анализ полученных переходных процессов (например, рис. 10) подтвердил эффективность известного способа улучшения качества процесса регулирования за счет увеличения коэффициента усиления $k_п$ базового П-регулятора частоты вращения. При увеличении этого коэффициента усиления время переходного процесса наброса нагрузки на дизель типа Д49 сначала заметно сокращается, а при дальнейшем увеличении коэффициента свыше $k_п = 10$ время переходного процесса остается практически неизменным. Но уже при таком сравнительно небольшом коэффициенте усиления $k_п$ возникает перерегулирование (заброс параметра). При еще большем коэффициенте усиления ($k_п = 100$ и выше) этот заброс

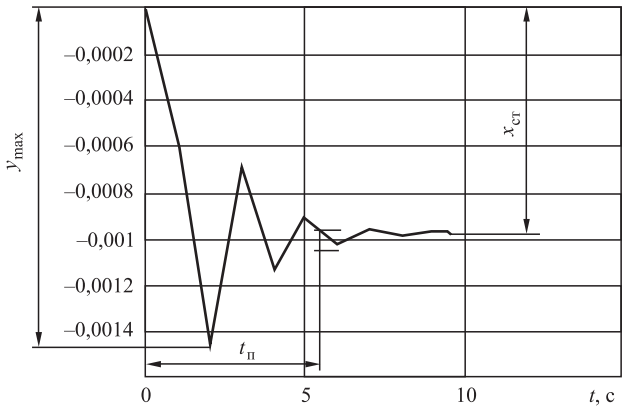


Рис. 10. Пример переходного процесса наброса нагрузки в САР частоты вращения дизеля Д49

параметра в переходном процессе наброса нагрузки увеличивается, в САР появляется ярко выраженная колебательность. То есть у этого способа улучшения качества процесса регулирования имеются ограничения со стороны больших значений коэффициента усиления $k_п$.

Диапазон возможных значений коэффициента усиления $k_п$ базового П-регулятора может быть существенно расширен (без появления колебательности САР) путем введения в структуру регулятора последовательно включенных корректирующих звеньев, в частности форсирующего звена. Применительно к дизелям ДГУ проблема

оптимизации параметров П-регулятора с последовательно включенными корректирующими звеньями остается недостаточно изученной. При такой оптимизации САР оптимизируемыми (варьируемыми) параметрами регулятора являлись коэффициенты $k_п$ и $T_ф$ передаточных функций $W_п(p) = k_п$ и $W_{кор}(p) = T_ф p + 1$ соответственно базового П-регулятора и последовательно включенного корректирующего форсирующего звена.

При оптимизации схема моделирования САР дополнена блоками, формирующими критерии оптимальности. В качестве одного из частных критериев оптимальности использовано максимальное отклонение (заброс) регулируемого параметра в переходном процессе y_{max}, моделируемое блоками "ABS" (модуль или абсолютное значение) *13*, "MAX" (максимум) *14* и "В память" *15* (см. рис. 9). За второй частный критерий оптимальности принята статическая ошибка регулирования $x_{ст}$, моделируемая блоками "ABS" *13* и "В память" *16*. В качестве третьего частного критерия оптимальности выбрана продолжительность переходного процесса $t_п$. В библиотеке типовых блоков ПК "МВТУ" нет блока измерения времени переходного процесса. Он создается в виде структуры, содержащей блок "ABS" *13*, "ключ 3" *17*, "задержка на шаг" *18*, "В память" *19*, "часы" (модельное время) *20*.

Схема работает следующим образом. На средний (логический) входной порт ключа подается выходной сигнал САР. Если этот сигнал больше допустимой зоны, то на выход ключа передается сигнал с 3-го (нижнего) входного порта, т. е. текущее модельное время. Если выходной сигнал САР меньше допустимой зоны, то на выход ключа передается сигнал с 1-го (верхнего) входного порта, т. е. тот же сигнал, но задержанный на один шаг интегрирования. В ПК "МВТУ" оптимизация параметров САР может быть проведена как по одному критерию оптимизации (в этом случае блоки, относящиеся к остальным критериям, выключаются из схемы), так и по нескольким критериям.

При оптимизации значений коэффициентов $k_п$ и $T_ф$ передаточных функций базового П-регулятора и последовательно включенного корректирующего форсирующего звена с использованием ПК "МВТУ" задается диапазон изменения оптимизируемых параметров. При этом диапазон изменения коэффициентов усиления $k_п$ П-регулятора выбран от $k_п = 1$ до $k_п = 800$. В П-регуляторах с последовательно включенными корректирующими звеньями теоретически возможно использование коэффициента усиления $k_п = 1000$ и более. Однако необходимо учитывать, что дизель является тепловым двигателем циклического действия. При этом наличие в структуре САР усилительного элемента с коэффициентом усиления $k_п = 1000$ и более приводит к тому, что нестабильность частоты вращения коленчатого вала, обусловленная чередованием тактов двигателя в его различных цилиндрах, становится настолько значимой, что невозможно осуществить осреднение частоты вращения электронным регулятором в пределах одного цикла работы двигателя.

Диапазон изменения постоянной времени $T_ф$ корректирующего форсирующего звена в соответствии с предварительно проведенными расчетами выбран от $T_ф = 0$ до $T_ф = 0{,}15$ с. При большем значении постоянной времени $T_ф$ задержка передачи сигнала в корректирующем форсирующем звене становится значительной, и быстродействие САР заметно снижается.

Оценка влияния коэффициентов $k_п$ и $T_ф$ на показатели качества процесса регулирования $t_п$, y_{max}, $x_{ст}$ проведена путем варьирования значения каждого из упомянутых коэффициентов при фиксированных оптимальных значениях другого коэффициента. На рис. 11 представлены характеристики показателей качества процесса регулирования $t_п$, y_{max}, $x_{ст}$ в исследуемой САР при постоянном оптимальном значении постоянной времени корректирующего форсирующего звена $T_ф = 0{,}05$ с и изменении коэффициента усиления П-регулятора в интервале от $k_п = 1$ до $k_п = 800$. При $k_п = 800$ достигнуто благоприятное сочета-

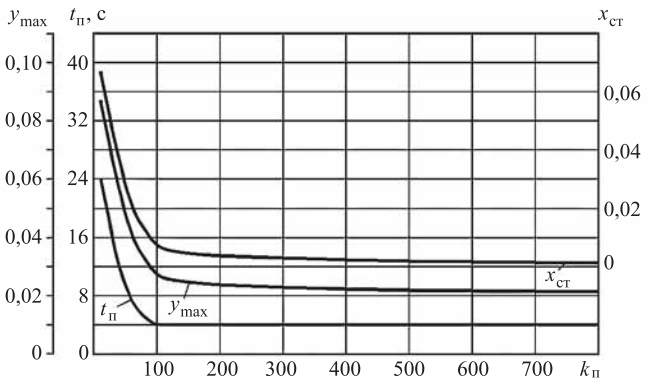


Рис. 11. Зависимость продолжительности переходного процесса наброса нагрузки $t_п$, максимального отклонения регулируемого параметра в этом процессе y_{max}, статической ошибки регулирования $x_{ст}$ от коэффициента усиления П-регулятора $k_п$ при постоянном значении постоянной времени корректирующего форсирующего звена $T_ф = 0{,}05$ с

ние исследуемых показателей качества $t_п$, y_{max}, $x_{ст}$. Как следует из этих характеристик, при небольших значениях коэффициента $k_п$ (до $k_п$ = 100) все показатели качества ($t_п$, y_{max}, $x_{ст}$) переходного процесса наброса нагрузки на дизель Д49 оказываются повышенными. При увеличении $k_п$ в диапазоне от 100 до 800 эти показатели продолжают уменьшаться, но их снижение становится незначительным. Минимальные значения показателей качества процесса регулирования ($t_п$ = 4,0 с, y_{max} = 0,0022, $x_{ст}$ = 0,0010) достигнуты при $k_п$ = 800.

Значительное влияние на показатели качества процесса регулирования оказывает и постоянная времени $T_ф$ корректирующего форсирующего звена. Об этом свидетельствуют переходные процессы исследуемой САР, полученные при оптимальном значении коэффициента усиления П-регулятора $k_п$ = 800 и изменении постоянной времени корректирующего форсирующего звена в диапазоне от $T_ф$ = 0 до $T_ф$ = 0,15 с. Зависимость показателей качества процесса регулирования $t_п$, y_{max}, $x_{ст}$ в этом диапазоне изменения постоянной времени $T_ф$ приведены на рис. 12.

Характеристики на рис. 12 показывают, что благоприятное сочетание показателей качества $t_п$, y_{max}, $x_{ст}$ получено при постоянной времени $T_ф$ = 0,05 с. В частности, при этом значении $T_ф$ достигается минимум продолжительности переходного процесса $t_п$ = 4,0 с, а при уменьшении или увеличении значения $T_ф$ продолжительность переходного процесса $t_п$ заметно возрастает.

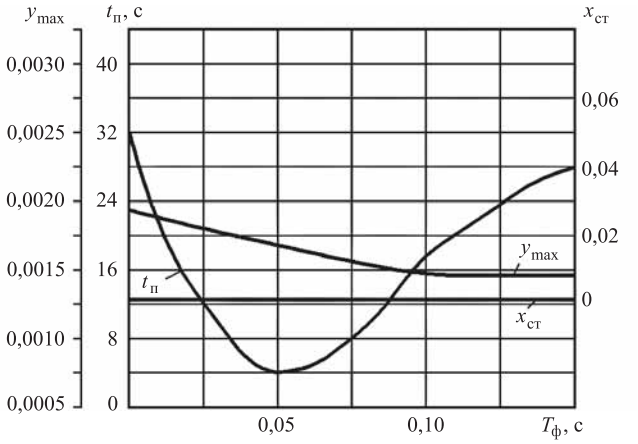


Рис. 12. Зависимость продолжительности переходного процесса наброса нагрузки $t_п$, максимального отклонения регулируемого параметра в этом процессе y_{max}, статической ошибки регулирования $x_{ст}$ от постоянной времени корректирующего форсирующего звена $T_ф$ при постоянном оптимальном значении коэффициента усиления базового П-регулятора $k_п$ = 800

Представленные результаты расчетных исследований подтверждают значительную зависимость рассматриваемых показателей качества процесса регулирования $t_п$, y_{max}, $x_{ст}$ от коэффициентов $k_п$ и $T_ф$. Предложенная методика выбора значений коэффициентов $k_п$ и $T_ф$ базового П-регулятора и последовательно включенного корректирующего форсирующего звена отличается простотой, не требует проведения трудоемких расчетных исследований и может быть использована для определения параметров электронных регуляторов частоты вращения с различной структурой.

Проведенные расчетные исследования показали, что существуют оптимальные с точки зрения выбранных показателей качества параметры П-регулятора с последовательно включенным корректирующим форсирующим звеном. При этом коэффициент усиления базового П-регулятора $k_п$ может изменяться в достаточно широких пределах (в проведенных исследованиях — от 1 до 800). Более того, отмечено, что принципиально возможен выбор и бóльших значений коэффициентов усиления $k_п$. Поэтому определенный интерес представляет разработка методики расчета возможного с точки зрения устойчивости САР и показателей качества процесса регулирования диапазона изменения параметров $k_п$ и $T_ф$ регулятора с последовательно включенным корректирующим форсирующим звеном. Предложенная методика параметрического синтеза САР дизеля базируется на использовании метода D-разбиения, позволяющего определить диапазон изменения одного или двух неизвестных параметров регулятора, обеспечивающий заданные показатели работы САР [2, 5].

При проведении такого исследования использована математическая модель САР частоты вращения дизеля ДГУ, разработанная выше. Полученное уравнение (33) дизеля с турбонаддувом с учетом выражения (34) для собственного оператора дизеля, выражения (35) для оператора воздействия со стороны дозирующего органа топливоподачи и выражения (36) для оператора воздействия со стороны потребителя (изменение настройки электрогенератора ДГУ) принимает вид:

$$\left(T_{дн}^2 p^2 + T_{кдн} p + 1\right)\varphi = \\ = k_s\left(T_s p + 1\right)к + k_u\left(T_u p + 1\right)\alpha_д. \quad (74)$$

Если в уравнениях (6) и (10) собственно двигателя принять настройку потребителя неизменной ($\alpha_д$ = 0), то второе слагаемое правой части уравнения (74) становится равным нулю и это уравнение принимает вид:

$$\left(T_{\text{дн}}^2 p^2 + T_{\text{кдн}} p + 1\right)\varphi = k_s\left(T_s\, p + 1\right)\text{к}. \qquad (75)$$

В соответствии с выражением (75) передаточная функция объекта регулирования по регулирующему воздействию к приобретает вид:

$$W_{\text{дн}}(p) = \frac{k_s\left(T_s p + 1\right)}{T_{\text{дн}}^2 p^2 + T_{\text{кдн}} p + 1}. \qquad (76)$$

Если пренебречь инерционностью датчика частоты вращения и ИМ рассматриваемого регулятора частоты вращения, то после объединения передаточных функций (70) базового П-регулятора и (71) последовательно включенного корректирующего форсирующего звена получим передаточную функцию регулятора в виде:

$$W_{\text{р}}(p) = k_{\text{п}}(T_{\text{ф}} p + 1). \qquad (77)$$

С учетом представленной математической модели исследуемой САР с базовым П-регулятором и последовательно включенным корректирующим форсирующим звеном структурная схема САР на рис. 7 преобразуется в структурную схему на рис. 13.

После объединения передаточных функций объекта регулирования $W_{\text{дн}}(p)$ и регулятора $W_{\text{р}}(p)$, описываемых формулами (76) и (77), с использованием соотношения для встречно-параллельного соединения звеньев получим передаточную функцию САР по воздействию $\alpha_{\text{д}}$ (по настройке потребителя N) в виде:

$$W_{\text{САР}}(p) = \frac{k_s\left(T_s p + 1\right)/\left(T_{\text{им}} p + 1\right)}{\left(T_{\text{дн}}^2 p^2 + T_{\text{кдн}} p + 1\right)\left(T_{\text{им}} p + 1\right) + k_s k_{\text{рег}}\left(T_s p + 1\right)\left(T_{\text{форс}} p + 1\right)}. \qquad (78)$$

Приравнивая знаменатель выражения (78) нулю и пренебрегая постоянной времени исполнительного механизма ($T_{\text{им}} = 0$), получим характеристическое уравнение САР в виде:

$$\left(T_{\text{дн}}^2 p^2 + T_{\text{кдн}} p + 1\right) + k_s k_{\text{рег}}\left(T_s\, p + 1\right)\left(T_{\text{форс}} p + 1\right) = 0 \qquad (79)$$

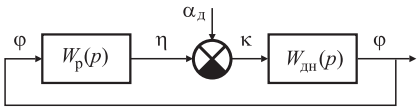


Рис. 13. Структурная схема САР частоты вращения дизеля с турбонаддувом и регулятором частоты вращения с базовым П-регулятором и последовательно включенным корректирующим форсирующим звеном

или

$$T_{\text{дн}}^2 p^2 + T_{\text{кдн}} p + 1 + k_s k_{\text{рег}} T_s T_{\text{форс}} p^2 + k_s k_{\text{рег}} T_s p + k_s k_{\text{рег}} T_{\text{форс}} p + 1 = 0. \qquad (80)$$

Приняв в качестве неизвестной величины λ постоянную времени корректирующего форсирующего звена $T_{\text{ф}} = \lambda$ и осуществив подстановку рассчитанных по выражениям (37), (38), (39), (41) значений констант $T_{\text{дн}}{}^2 = 18{,}76$ с^2, $T_{\text{кдн}} = 11{,}43$ с, $k_s = 1{,}39$, $T_s = 2{,}07$ с, после группировки слагаемых получим характеристическое уравнение САР в виде:

$$18{,}76p^2 + 299{,}16p + 287{,}73\lambda p^2 + 139\lambda p + 2 = 0. \qquad (81)$$

Полученное выражение может быть использовано для синтеза исследуемой САР по устойчивости. Уравнение (81) после его записи относительно неизвестного параметра $\lambda = T_{\text{ф}}$, подстановки условия границы устойчивости $p = i\omega$, выделения вещественной $X(\omega)$ и мнимой $iY(\omega)$ частей и преобразований приобретает вид:

$$\lambda(\omega) = X(\omega) + iY(\omega), \qquad (82)$$

где

$$X(\omega) = \frac{31\,976\omega^2 - 4100}{8279\omega^2 + 19\,321}, \quad Y(\omega) = \frac{-3470\omega^3 + 2785\omega}{8279\omega^4 + 19\,321\omega^2}. \qquad (83)$$

При варьировании частоты колебаний входного сигнала от $-\infty$ до $+\infty$ выражения (83) позволили получить кривую D-разбиения, показанную на рис. 14, *а*. После нанесения штриховки на эту кривую (слева при движении по кривой D-разбиения от $-\infty$ до $+\infty$) выделен диапазон изменения неизвестного параметра λ, обеспечивающий устойчивую работу САР. Для кривой D-разбиения на рис. 14, *а* этот диапазон равен $-0{,}212 < \lambda = T_{\text{ф}} < +0{,}875$. Поскольку постоянная времени корректирующего форсирующего звена $T_{\text{ф}}$ не может быть отрицательной, указанный диапазон принят равным 0 с $< \lambda = T_{\text{ф}} <$ 0,875 с.

Для синтеза САР по качеству процесса регулирования — по быстродействию САР характеристическое уравнение (81) записывается относительно новой мнимой оси плоскости корней характеристического уравнения САР, смещенной влево на величину степени устойчивости $\alpha_{\text{у}}$, в виде:

$$18,76\left(p-\alpha_{\text{у}}\right)^2+299,16\left(p-\alpha_{\text{у}}\right)+ \\ +287,73\lambda\left(p-\alpha_{\text{у}}\right)^2+139\lambda\left(p-\alpha_{\text{у}}\right)+2=0. \quad (84)$$

При этом степень устойчивости $\alpha_{\text{у}}$, определяемая как расстояние от мнимой оси плоскости корней характеристического уравнения САР до ближайших к ней корней этого уравнения, связана с продолжительностью переходного процесса $t_{\text{п}}$ следующей приближенной зависимостью:

$$t_{\text{п}} \approx 3/\alpha_{\text{у}}. \quad (85)$$

Уравнение (84) после раскрытия скобок, записи уравнения относительно неизвестного параметра $\lambda = T_{\text{ф}}$, подстановки условия границы устойчивости $p = i\omega$, ограничения продолжительности переходного процесса значением $t_{\text{п}} = 10$ с ($\alpha_{\text{у}} = 0,3$), выделения вещественной $X(\omega)$ и мнимой $iY(\omega)$ частей и преобразований получает вид:

$$\lambda(\omega) = X(\omega) + iY(\omega), \quad (86)$$

где

$$X(\omega)=\frac{2398\omega^4+2456\omega^2+360}{39\ 580\omega^4+10\ 224\omega^2+12\ 000}, \\ Y(\omega)=\frac{2198\omega^3-3654\omega}{39\ 580\omega^4+10\ 224\omega^2+12\ 000}. \quad (87)$$

Варьирование частоты колебаний входного сигнала от $-\infty$ до $+\infty$ в выражениях (87) позволили получить кривую *D*-разбиения, показанную на рис. 14, *б*. После нанесения штриховки на эту кривую выделен диапазон изменения неизвестного параметра λ, обеспечивающий продолжительность переходного процесса $t_{\text{п}} < 10$ с. Для кривой *D*-разбиения, представленной на рис. 14,*б* этот диапазон равен 0,03 с < $\lambda = T_{\text{ф}} < 0,08$ с. В исследуемой САР минимальная продолжительность переходного процесса $t_{\text{п}} = 4,2$ с достигается при постоянной времени $T_{\text{ф}} = 0,05$ с. Это на 4,5 % меньше, чем в САР с ПИД-регулятором ($t_{\text{п}} = 4,4$ с, см. рис. 1).

Следует отметить, что рассмотренный регулятор частоты вращения с последовательно включенным корректирующим форсирующим звеном можно рассматривать как модификацию традиционного ПИД-регулятора, в которой отсутствует интегральная составляющая объекта регулирования. Этот регулятор с последовательно включенным корректирующим форсирующим звеном с передаточной функцией $W_{\text{р}}(p) = k_{\text{п}}(T_{\text{ф}}p + 1)$ является ПД-регулятором, поскольку первое

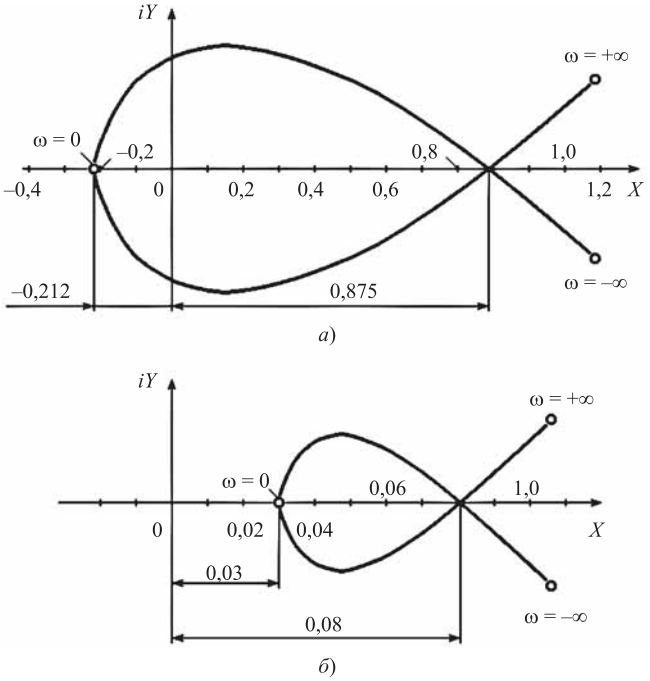


Рис. 14. Кривые *D*-разбиения в плоскости неизвестного параметра $\lambda = T_{\text{ф}}$ при коэффициенте усиления пропорционального регулятора $k_{\text{п}} = 100$:

а — при синтезе САР по устойчивости; *б* — при синтезе САР по качеству процесса регулирования и ограничении $t_{\text{п}} < 10$ с

слагаемое этой передаточной функции ($k_{\text{п}}\ T_{\text{ф}}\ p$) описывает Д-регулятор, а второе слагаемое ($k_{\text{п}}$) — П-регулятор. При этом отсутствие интегральной составляющей позволяет реализовывать большие значения коэффициента усиления П-регулятора $k_{\text{п}}$.

Недостатком рассмотренного регулятора по сравнению с ПИД-регулятором является наличие статической ошибки регулирования $x_{\text{ст}}$. Однако при коэффициенте усиления $k_{\text{п}} = 100...800$ она не превышает 0,008 или 0,8 % (см. рис. 11). Такие малые значения $x_{\text{ст}}$ оказываются соизмеримы с допустимой нестабильностью частоты вращения ν в САР первого класса точности (см. табл. 1), поэтому определить эту минимальную статическую ошибку регулирования $x_{\text{ст}}$ практически не удается, и такой регулятор можно рассматривать как астатический (с нулевой $x_{\text{ст}}$). Возможная колебательность переходных процессов САР с последовательно включенным корректирующим форсирующим звеном подавляется при включении в ее структуру интегродифференцирующего (подавляющего) звена (см. рис. 3).

В целом, проведенные исследования подтвердили преимущества П-регулятора с последовательно включенными корректирующими звеньями по сравнению с традиционным ПИД-регулятором.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Дизельные двигатели** для электроагрегатов и электростанций / Б. Е. Поликер, Л. Л. Михальский, В. А. Марков, В. К. Васильев, Д. И. Буханец; под ред. Б. Е. Поликера. — М.: Легион-Автодата, 2006. — 328 с.
2. **Грехов Л. В., Иващенко Н. А., Марков В. А.** Топливная аппаратура и системы управления дизелей. — М.: Легион-Автодата, 2005. — 344 с.
3. **Марков В. А., Баширов Р. М., Габитов И. И.** Токсичность отработавших газов дизелей. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 376 с.
4. **ГОСТ Р 55231—2012.** Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных двигателей внутреннего сгорания. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2013. — 18 с.
5. **Методы** классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5 томах / А. И. Баркин, Е. М. Воронов, В. Г. Коньков и др.; под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. 656 с.
6. **Поздняков Е. Ф.** Анализ эффективности использования регулятора частоты вращения с последовательно включенными корректирующими звеньями в дизельном двигателе дизель-генераторной установки. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.02. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 150 с.
7. **Марков В. А., Поздняков Е. Ф., Шленов М. И.** Улучшение показателей качества системы автоматического регулирования частоты вращения дизель-генератора // Известия вузов. Машиностроение. — 2007. — № 1. — С. 29—39.
8. **Коссов Е. Е., Шапран Е. Н., Фурман В. В.** Совершенствование режимов работы силовых энергетических систем тепловозов. — Луганск: Изд-во Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, 2006. — 280 с.
9. **Володин А. И., Сергеев С. В., Кирьяков М. Н.** Применение микропроцессорных систем управления электропередачей тепловозов для реализации оптимальных режимов работы дизелей // Известия Транссиба. — 2012. — № 3. — С. 18—23.
10. **Машиностроение.** Энциклопедия. Том IV. Двигатели внутреннего сгорания / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков и др.; под ред. А. А. Александрова, Н. А. Иващенко. — М.: Машиностроение, 2013. — 784 с.
11. **Крутов В. И.** Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания. — М.: Машиностроение, 1989. — 416 с.
12. **Статические характеристики** и переходные процессы дизель-генераторной установки тепловоза / В. А. Марков, Ф. Б. Барченко, А. Ю. Епишин, В. А. Неверов, Д. Г. Кибизов // Двигателестроение. — 2017. — № 3. — С. 3—8.
13. **Крутов В. И.** Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. — М.: Машиностроение, 1978. — 472 с.
14. **Виртуальные** учебно-исследовательские лаборатории / О. С. Козлов, И. П. Норенков, В. А. Трудоношин и др. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 36 с.
15. **Козлов О. С., Скворцов Л. М.** Исследование и проектирование автоматических систем с помощью программного комплекса "МВТУ" // Информационные технологии. — 2006. — № 8. — С. 10—12.

ИЗДАТЕЛЬСТВО

"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

принимает подписку на журнал

"ГРУЗОВИК"

ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС. СПЕЦТЕХНИКА

на 2018 год

Подписавшись в издательстве, вы:
1) получаете без задержек журнал с первого номера;
2) экономите на стоимости почтовой доставки;
3) получаете скидку до 5 %.

Наши реквизиты:
E-mail: realiz@mashin.ru
Тел.: 8 (495) 785-60-69.
Отдел продаж, маркетинга, рекламы
WWW.MASHIN.RU

УДК 656.135+004.942

А. Н. Якубович, д-р техн. наук, **И. А. Якубович,** д-р техн. наук, МАДИ
E-mail yakubovich_irina@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ АВТОДОРОЖНОЙ СЕТИ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ В УСЛОВИЯХ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

В результате численного моделирования, выполненного в соответствии с действующими нормами расчета, получены оценочные значения дополнительной глубины оттаивания многолетнемерзлых грунтов в основании автодорог, как следствие прогнозируемых климатических изменений на территории криолитозоны России. Величина полученных значений свидетельствует о реальной опасности нарушения функциональности автодорожной сети по причине появления сверхнормативных осадок профиля автодороги и дорожной одежды. В рамках использованной модели выявлены факторы, в наибольшей степени влияющие на расчетную глубину оттаивания — средняя температура воздуха за период положительных температур, тип грунта, его общая влажность. В то же время колебания зимних температур в диапазоне до 2 °С, как правило, не приводят к значимым изменениям глубины оттаивания грунта. Для получения уточненных прогнозных значений глубины оттаивания грунта и осадок автодороги предложено использовать моделирование динамики температурного режима грунтов на протяжении, как минимум, одного полного года.

Ключевые слова: *изменение климата, дорожная сеть, осадка автодороги, снижение эксплуатационных качеств.*

The numerical simulation performed in accordance with the applicable rules of calculation, estimated values for the depth of thawing of permafrost soils at the base of roads, as a consequence of predicted climate changes on the territory of permafrost zone of Russia. The magnitude of the obtained values indicates a real risk of violation of functionality of the road network in the cause of excess sediment profile of the road and the pavement. In the framework of used model factors have the greatest influence on the estimated depth of thaw — the average temperature for the period of positive temperatures, type of soil, the total moisture content. At the same time, fluctuations in winter temperatures in the range of 2 °C, as a rule, do not lead to significant changes in the depth of thawing of soil. To obtain the updated projected depth of thawing of the soil and sediment of the road is proposed to use simulation of dynamics of temperature regime of soils for at least one full year.

Keywords: *climate change, road network, sediment road, the drop in performance.*

Автодорожная сеть, расположенная на территории Северных регионов России, отличается весьма тяжелыми условиями эксплуатации. В первую очередь это обусловлено наличием вечномерзлых либо многолетнемерзлых грунтов, на которых возведение автодорог производится по специальным технологиям; при этом основной целью является сохранение подстилающих дорогу грунтов в мерзлом состоянии в течение всего периода ее эксплуатации.

Нарушение этого условия, возможное по причине аномально высоких летних температур воздуха в определенном году, либо вследствие систематического повышения среднегодовых температур на рассматриваемой территории, приводит к сверхнормативному оттаиванию вечномерзлых толщ и появлению неравномерных осадок расположенных на них автодорог. В результате существенно снижаются эксплуатационные качества дорожной сети; данные процессы ухудшения функциональности усиливаются по причине большой доли грузовых перевозок в Северных регионах, что вызывает повышенные нагрузки на дорожное покрытие и на профиль автодороги в целом.

Снижению эксплуатационных качеств автодорожной сети также способствует отсутствие твердого покрытия у значительной части северных автодорог, что делает их максимально уязвимыми к внешним воздействиям. Необходимо отметить также частое наличие единственной автодороги между определенными пунктами, что, в случае

снижения ее функциональности, не позволяет организовать альтернативные маршруты и весьма негативно сказывается на пропускной способности поврежденного сегмента транспортной сети.

В последние годы на Северных территориях России зафиксирована явно выраженная тенденция к увеличению глубины оттаивания грунта в летний период (возрастанию средней мощности сезонно-талого слоя). Основной причиной данного явления служит общемировой тренд к увеличению среднегодовых температур воздуха, наблюдаемый в рамках глобальных климатических изменений на протяжении последних десятков лет. Начиная с начала 2000-х годов выполнялись многочисленные прогнозы распространения приповерхностных многолетнемерзлых пород и глубины сезонного оттаивания для нескольких модельных сценариев климата будущего.

В работе [1] показано, что по имеющимся оценкам, глобальное изменение климата будет наиболее интенсивным в области высоких широт северного полушария и вызовет заметные изменения вечной мерзлоты. В период до 2050 г. прогнозируется общее сокращение площади вечной мерзлоты в Северной Евразии (практически полностью присутствующей на территории России) на величину от 13 до 22 %. Причем наиболее быстрое сокращение площади ожидается в зонах неустойчивой вечной мерзлоты — прерывистой и островной. Возрастание глубины сезонного оттаивания прогнозируется от 15...25 % (Западная Сибирь) до 40...50 % (Чукотка и Дальний Восток).

Не подвергая сомнению показанные общие тенденции деградации вечной мерзлоты на территории России (а значит, и существенного снижения несущей способности грунтов), необходимо отметить, что принятые в работе темпы роста среднемесячных температур (0,1 °С ежегодно на протяжении 80 лет) представляются чрезмерными. Соответственно, полученные по результатам моделирования оценки ожидаемых глубин оттаивания также представляются в определенной степени завышенными.

Более реалистичными можно считать результаты моделирования сезонно-талого слоя, выполненные в [2]. Показано, что в период 1981—2000 гг. изменение мощности сезонно-талого слоя под воздействием глобальных климатических изменений не превосходит величин, обусловливаемых естественной изменчивостью климата; таким образом, зафиксированные в течение этого времени колебания глубин оттаивания фактически представляют собой "информационный шум", не связанный с антропогенным воздействием на окружающую среду. Вместе с этим ожидается, что в период 2041—2060 гг. увеличение мощности сезонно-талого слоя уже будет обусловлено именно антропогенными факторами, под влиянием которых потепление будет заметно более значительным, чем в конце XX века. В частности, для центральных регионов Сибири к середине XXI века ожидается изменение (увеличение) глубины сезонного оттаивания в диапазоне 30...60 см для суглинков и 0...30 см для торфяных почв.

Систематическое снижение несущей способности многолетнемерзлых грунтов на территории Северных регионов России, происходящее под влиянием глобального изменения климата, показано в [3]. Принимая несущую способность грунта в период 1960—1970 гг. за 100 %, можно видеть, что к периоду 2000—2010 гг. она составляла: для Западной Сибири — 63...96 %, для Центральной Сибири — 74...94 %, для Якутии — 54...96 %, для Чукотки — 52...84 %. Расчетная продолжительность эксплуатации зимних автодорог (за период между 1965—1975 гг. и 1995—2005 гг.) также имеет явно выраженную тенденцию к сокращению, которая на большей части Ямало-Ненецкого АО превышает 10 дней. В то же время в центральных районах Якутии за тот же период наблюдается увеличение продолжительности периода эксплуатации, в том числе на 10 дней и более. Это свидетельствует, при подтверждении общей тенденции к потеплению климата, о наличии существенных неравномерностей в этом процессе и необходимости выявления его темпов с учетом индивидуальных особенностей территории.

К аналогичному выводу приходит работа [4], в которой выполнен анализ устойчивости сооружений криолитозоны в свете глобальных изменений окружающей среды. Показано, что температуры мерзлых пород не всегда следуют за изменениями температур воздуха; соответственно, для получения достоверных прогнозных данных необходимо многоаспектное моделирование с учетом температурного режима окружающей среды на протяжении достаточно протяженных периодов (не менее 3—4 лет).

В работе [5], наряду со статистически подтвержденным фактом продолжающегося потепления климата (на уровне достоверности 99,9 %), констатировано, что пространственная картина региональных температурных трендов весьма неоднозначна; в ряде регионов зафиксирована тенденция к некоторому понижению среднегодовых температур. Кроме того, даже в пределах одной

территории выявлена значительная изменчивость температуры воздуха на протяжении следующих друг за другом лет, что не позволяет достоверно прогнозировать температуру воздуха, а значит, и температурный режим грунта, для конкретного года, сезона, месяца. Для целей моделирования климатических показателей, в том числе температуры воздуха, и определения на их основе глубин сезонного оттаивания, предлагается использовать некоторый среднестатистический год, характеризующийся средними, за определенный предшествующий период, значениями этих показателей.

Нормами проектирования, действующими в отношении автодорог, возводимых на вечномерзлых грунтах, предусмотрено два принципа. Проектирование по первому принципу направлено на сохранение в течение всего периода эксплуатации автодороги верхнего горизонта вечной мерзлоты на уровне не ниже подошвы насыпи земляного полотна. Глубина сезонного оттаивания в этом случае определяет необходимую высоту насыпи, гарантирующее постоянное пребывание грунтов под подошвой в мерзлом состоянии. Второй принцип проектирования допускает оттаивание грунтов в основании насыпи с учетом допустимой осадки покрытия (определяемой по расчетной глубине сезонного оттаивания в насыпи и грунтах основания). Независимо от принципа, использованного при проектировании автодороги, наблюдаемая в процессе ее эксплуатации фактическая глубина оттаивания грунта не должна превышать расчетную (учтенную на стадии проектирования) величину. Нарушение этого требования приводит к появлению неучтенной и неравномерно проявляющейся по длине автодороги осадки, величина которой прямо зависит от превышения фактической глубины оттаивания $h_ф$ над расчетной h_0, обозначаемой в дальнейшем Δh. Таким образом, дополнительная глубина оттаивания грунта $\Delta h = h_ф - h_0$, соответствующая прогнозным климатическим условиям и определяемая по результатам математического моделирования, рассматривается как главный показатель ухудшения эксплуатационного состояния автодороги в новых климатических условиях.

При невозможности определения глубины сезонного оттаивания опытным путем, действующие нормы проектирования [6] позволяют вычислять ее величину аналитически. Для этой цели в [6] представлена достаточно сложная модель, связывающая между собой, в зависимости от температуры, физические, теплофизические и прочностные характеристики многолетнемерзлых грунтов. Данная модель была численно реализована в среде инженерного программирования MathCad и использована для анализа динамики расчетной глубины оттаивания под влиянием прогнозных климатических изменений. Основными исходными данными при выполнении численного моделирования являлись:

— физико-механические характеристики грунта в основании автодороги: его тип (песчаный, глинистый, заторфованный), тип засоления и его величина (при наличии), влажность и льдистость, плотность скелета грунта;

— параметры, характеризующие среднегодовой температурный режим окружающей среды на территории расположения автодороги; в рамках принятой модели такими параметрами являлись: средние температуры воздуха в течение периодов отрицательных и положительных температур, продолжительность периода отрицательных температур, средняя высота и плотность снегового покрова.

Результаты моделирования величин дополнительного оттаивания грунта Δh при повышении среднегодовой температуры воздуха на величину до 2 °С показаны на рис. 1. Изменение температуры учитывалось одновременным повышением средних температур (положительных и отрицательных) на одинаковую величину, без изменения остальных температурно-климатических параметров. Можно видеть практически линейную зависимость Δh от величины потепления воздуха. В песчаных грунтах, при повышении их влажности, наблюдается уменьшение глубины дополнительного оттаивания, которое, однако, существенно зависит от среднегодового температурного режима территории. Например, расчетные глубины дополнительного оттаивания грунта с влажностью 15 % (при повышении среднегодовой температуры воздуха на 2 °С) для Чары и Верхоянска примерно одинаковы (27,5 см и 22,1 см соответственно). При повышении влажности грунта до 30 % глубина дополнительного оттаивания составляет 14,1 см и 19,1 см (сокращение на 48,8 % и 13,5 % соответственно, что является значимым различием).

Также необходимо отметить наблюдаемое одновременно с повышением влажности песчаных грунтов снижение чувствительности Δh к внешним природно-климатическим условиям, что проявляется в более близких друг к другу траекториях Δh под влиянием изменения температуры. Диапазон расчетных значений Δh по всем рассмотренным точкам составил: при $\Delta t = 1$ °С от 6,5 см

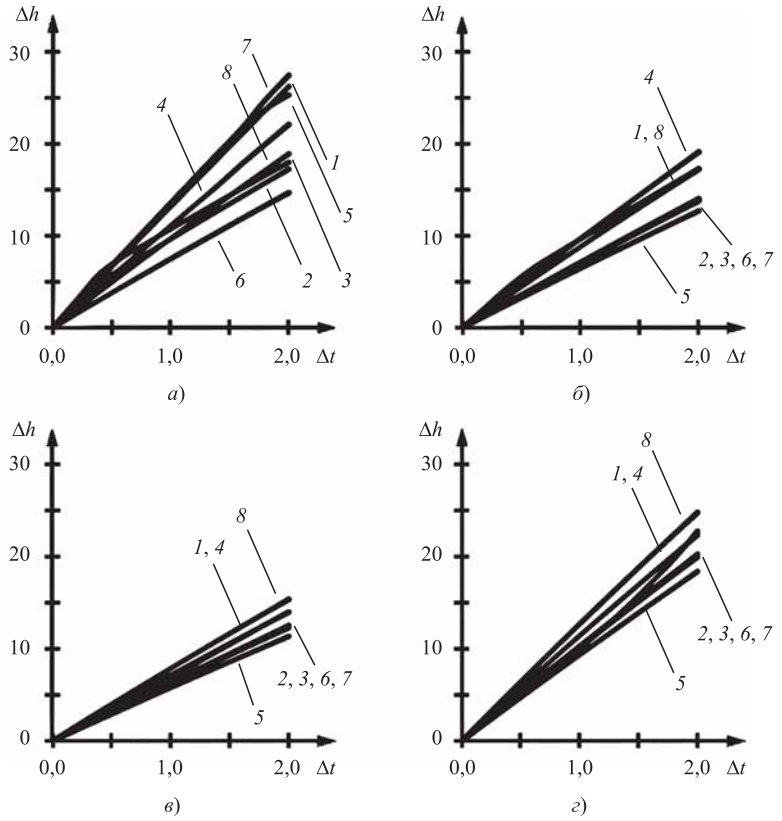


Рис. 1. Глубина оттаивания грунта в основании автодороги Δ*h* (см) при повышении среднегодовой температуры воздуха на величину Δ*t* (°С):

а — песчаный грунт, влажность 15 %; *б* — песчаный грунт, влажность 30 %; *в* — глинистый грунт, влажность 35 %; *г* — глинистый грунт, влажность 50 %;
1 — Анадырь; *2* — Воркута; *3* — Чита; *4* — Верхоянск; *5* — Якутск; *6* — Канск; *7* — Чара; *8* — Мурманск

(Якутск, влажность грунта 30 %) до 13,6 см (Чара, влажность грунта 15 %), при Δ*t* = 2 °С от 12,7 до 27,5 см в этих же точках.

Глинистые грунты, обладающие более высокой влажностью по сравнению с песчаными, также характеризуются достаточно близкими траекториями Δ*h*. Изменение этих траекторий с увеличением влажности грунта происходит равномерно, в сторону возрастания глубины дополнительного оттаивания. Повышение влажности глинистого грунта с 35 до 50 % вызывает увеличение Δ*h* на величину от 60 % (Анадырь) до 63 % (Верхоянск, Чита, Канск). Экстремальные значения Δ*h* (среди рассмотренных точек) получены для Якутска и Мурманска, где расчетная глубина дополнительного оттаивания составляет: при Δ*t* = 1 °С — 5,8 и 12,7 см соответственно, при Δ*t* = 2 °С — 11,4 и 24,8 см.

Помимо возможного повышения температуры воздуха, происходящего равномерно в течение всего года, было выполнено моделирование изменения контрастности температурного режима. При этом независимым параметром являлось повышение положительных температур на величину до 2 °С; одновременно с этим отрицательные температуры уменьшались до величин, обеспечивающих неизменность среднегодовой температуры по сравнению с их современными значениями. Расчетное понижение зимних температур зависело от продолжительности зимнего периода и составляло от 1,05 °С (Воркута) до 2,09 °С (Канск). Практически для всех ранее рассмотренных территорий были получены результаты, полностью совпадающие с рис. 1.

Это свидетельствует о весьма слабой зависимости глубины летнего оттаивания грунта автодороги от колебаний зимних температур воздуха, по крайней мере, в наиболее распространенных климатических условиях Российской криолитозоны и при изменениях зимних температур в пределах до 2 °С. Территория Верхоянска была единственной из показанных на рис. 1, для которой ее температурно-климатические особенности обусловили некоторое уменьшение глубины оттаивания при снижении среднего значения отрицательных температур (для песчаного грунта с низкой влажностью — на 32 %, для влажного глинистого грунта — на 10 %).

Анализ результатов моделирования для ряда дополнительных точек криолитозоны позволил выявить еще две территории, на которых значимо проявляется зависимость глубины оттаивания от колебаний отрицательных температур воздуха — это Омсукчан и Волочанка. Результаты моделирования показаны на рис. 2. Для песчаных грунтов влияние зимних температур на величину Δ*h* выражено сильнее, чем для глинистых; в результате при повышении контрастности годовых температур воздуха наибольшая прогнозная глубина оттаивания в песчаном грунте составила 17,2 см, а в глинистом — 26,3 см. Кроме того, глубина оттаивания глинистого грунта, по сравнению с песчаным грунтом, значительно сильнее зависит от его влажности.

Необходимо отметить, что появление дополнительного оттаивания в основании автодороги, превышающего 10...15 см, с высокой вероятностью

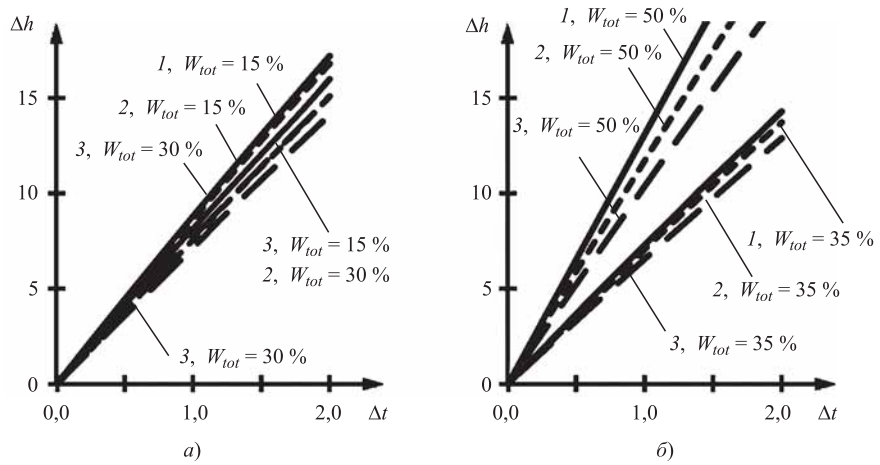


Рис. 2. Глубина оттаивания грунта в основании автодороги Δ*h* (см) при повышении положительных температур воздуха на величину Δ*t* (°С):
а — песчаный грунт; *б* — глинистый грунт; *1* — Омсукчан; *2* — Волочанка; *3* — Верхоянск; W_{tot} — влажность грунта

будет вызывать неравномерные осадки профиля автодороги и дорожного полотна, что приведет к существенному снижению ее эксплуатационных качеств. Достоверное прогнозирование таких деформаций автодорог и их своевременное предупреждение с помощью соответствующих инженерно-технических мероприятий позволит существенно снизить ущерб автодорожной сети от вероятных климатических изменений в криолитозоне России.

Выводы

1. Полученные по результатам численного моделирования оценочные значения сверхнормативного оттаивания многолетнемерзлых грунтов в основании автодорог составляют до 13,6 см при потеплении на 1 °С и до 27,5 см при потеплении до 2 °С. Это свидетельствует о существенной опасности нарушения функциональности автодорожной сети на территории криолитозоны России, и о необходимости проведения упреждающих инженерно-технических мероприятий по предотвращению этой опасности.

2. На большей части криолитозоны России изменение зимних температур в диапазоне до 2 °С не оказывает значимого влияния на расчетную глубину оттаивания. Повышение температуры воздуха в летний период, напротив, является главным фактором. Соответственно, наиболее опасными для состояния автодорожной сети являются климатические изменения, сопряженные с повышением положительных температур воздуха.

3. Предусмотренный в действующих нормах расчета [6] алгоритм определения глубины оттаивания основан на укрупненных показателях температурного режима на территории, что не позволяет в полной мере учитывать многообразие природно-климатических и грунтовых условий. Повышение точности оценки глубины оттаивания при климатических изменениях возможно путем численного моделирования температурного режима грунтов профиля и основания автодороги на протяжении не менее чем одного полного года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Анисимов О. А., Белолуцкая М. А.** Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогнозирование и оценка неопределенности. — Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — 2003, Т. 19. С. 21—38.
2. **Моделирование** региональных особенностей сезонноталого слоя в зоне вечной мерзлоты на территории Сибири / И. М. Школьник, Е. Д. Надежина, Т. В. Павлова и др. // Криосфера Земли. — 2012. — Т. XVI. — № 2. — С. 52—59.
3. **Анисимов О. А., Стрелецкий Д. А.** Геокриологические риски при таянии многолетнемерзлых грунтов // Арктика XXI век. Естественные науки. — 2015. — № 2 (3). — С. 60—74.
4. **Брушков А. В.** Глобальные изменения окружающей среды, реакция криолитозоны и устойчивость инженерных сооружений // Инженерные изыскания. — 2015. — № 14. С. 4—17.
5. **Груза Г. В., Ранькова Э. Я.** Вероятностная оценка наблюдаемых и ожидаемых изменений климата Российской Федерации: температура воздуха // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — 2011. — Т. 24. — С. 43—70.
6. **Основания и фундаменты** на вечномерзлых грунтах. СП 25.13330.2012 / Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. — М.: Изд-во ООО "Аналитик", 2012. — 118 с.

УДК 658.51-50
Д. В. Доленко, студент МАДИ
E-mail: dolenko66@yandex.ru

МЕТОДЫ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Методы сетевого планирования находят широкое применение во многих отраслях народного хозяйства, в том числе и на автомобильном транспорте. На автомобильном транспорте методы сетевого планирования позволяют рассмотреть различные варианты транспортировки грузов и выбрать оптимальный. В статье проведен анализ транспортного процесса с помощью методов сетевого планирования.

Ключевые слова: *методы сетевого планирования, сетевой график.*

Methods of network planning are widely used in many industries, including automotive transport. In road transport methods of network planning allows to consider various options of cargo transportation and to select the optimal. The article presents an analysis of transport process by using methods of network planning.

Keywords: *methods of network planning, network diagram.*

Введение

Важность использования методов сетевого планирования в производстве, бизнесе, торговле и т. д. отмечают многие специалисты. Например, профессор А. Н. Рахмангулов указывает: "Сетевое планирование и управление (СПУ) позволяет повысить эффективность управления благодаря рациональной организации производственных процессов, а также выявления и мобилизации скрытых ресурсов времени и материальных средств" [7, с. 98]. Профессор В. С. Лукинский отмечает: "Метод сетевого планирования позволяет на основе исходной информации указать сроки начала каждой работы комплекса, вычислить время, необходимое для выполнения всего комплекса работ, выявить критические работы, несвоевременное выполнение которых влечет за собой изменение общего времени выполнения всего комплекса, а также некритические работы, небольшие задержки в выполнении которых не сказываются на общей продолжительности комплекса" [5, с. 305].

Несмотря на актуальность методов сетевого планирования и управления, на транспортных предприятиях при планировании и организации работ они не получили должного распространения. Основная причина этого, по мнению профессора А. Н. Рахмангулова — наличие на транспорте других резервов — технологических, технических и др., совокупная величина которых, как правило, превышает потери вследствие неправильной организации производственного процесса. Кроме того, недостаточна, в большинстве случаев, подготовка руководителей в вопросах организации и управления предприятием в рыночных условиях, которая не позволяет им в полной мере оценить и правильно использовать современные организационные методы. Изучение зарубежного опыта сетевого планирования показывает, что правильно и без лишних потерь осуществить реорганизацию существующей системы управления, гибко подстроиться под меняющуюся экономическую ситуацию возможно только в случае целенаправленного анализа организации производства с использованием современных методов сетевого планирования и управления, с использованием сетевых графиков [7, с. 98].

Описанная проблема определила объект исследования, которым стало сетевого планирование на транспорте. Предметом исследования — использование сетевого графика для оптимизации транспортного процесса.

Цель проведенного исследования — поиск возможностей применения методов сетевого планирования, и разработки сетевого графика для оптимизации управления транспортными процессами.

Задачи исследования:

1) анализ современных методов сетевого планирования применяемых на производстве;

2) рассмотрение возможности применения методов сетевого планирования и составления сетевого графика при организации транспортных процессов.

Методы исследования: литературный анализ применяемых методов сетевого планирования и сетевых графиков на производстве и на транспорте, моделирование организации транспортного процесса с использованием этих методов.

Результаты исследования

Как показал анализ литературы, сетевое планирование — это метод управления, который основывается на использовании теории графов и системного подхода для отображения и алгоритмизации комплексов взаимосвязанных работ, действий или мероприятий для достижения четко поставленной цели. Оно позволяет определить, во-первых, какие работы или операции из числа многих, составляющих проект, являются "критическими" по своему влиянию на общую продолжительность проекта и, во-вторых, каким образом построить наилучший план проведения всех работ по данному проекту с тем, чтобы выдержать заданные сроки при минимальных затратах [8].

Сетевое планирование имеет ряд преимуществ:

— дает четкое представление об объеме работ;

— обеспечивает наглядность технологической последовательности работ;

— позволяет составить оперативные и текущие планы, а также прогнозировать сложные процессы;

— позволяет выявить скрытые ресурсы времени и материальных средств при выполнении проекта и значительно повысить их эффективность [3, с. 31].

Основная цель сетевого планирования — сокращение до минимума продолжительности проекта следующими методами:

1) многокритериальной оценкой в условиях неопределенности;

2) диаграммой Ганта;

3) методом критического пути;

4) методом оценки и пересмотра планов PERT.

Результатами применения данных методов являются построения рабочих таблиц и сетевых графиков.

При организации транспортного процесса метод многокритериальной оценки в условиях неопределенности позволяет найти оптимальный маршрут транспортировки груза в смешанном сообщении на основе сетевого графика.

Если, например, необходимо доставить груз из города Тель-Авив (Израиль) до города Самара (Россия), используя данные стоимости и времени доставки каждого этапа перевозки, указанной в статье Я. С. Болтовой [2], можно представить следующие варианты доставки груза (рис. 1).

При смешанных перевозках для принятия управленческих решений сетевой график можно представить как пространственно-зависимые схемы доставки с учетом различных параметров.

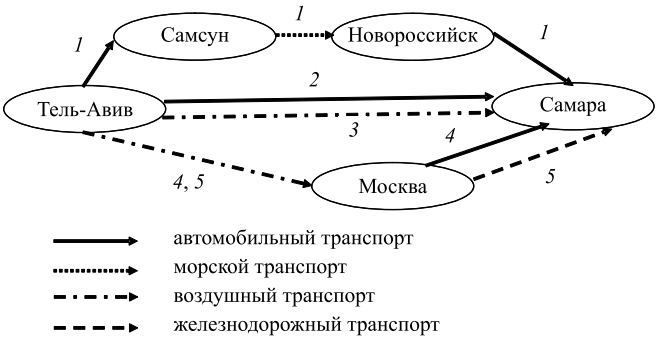


Рис. 1. Маршруты по направлению Тель-Авив — Самара

В качестве критериев выбора варианта доставки используется время (T), стоимость (С) и приведенная стоимость (С*), которую определяют по формуле:

$$C^* = (C_{гр} + C_{п})^*(1 + \Delta)^n,$$

где С* — оценка стоимости груза и его доставки с учетом фактора времени (интегральная оценка); $C_{гр}$ — закупочная стоимость груза; $C_{п}$ — стоимость перевозки; $(1 + \Delta)^n$ — множитель наращивания процентов по процентной ставке $\Delta = 15$ % за n периодов, $n = T/365$.

Порядок действий при перевозке груза, необходимый для построения сетевого графика, иллюстрирует табл. 1.

На основании перечисленных работ можно построить сетевую модель, придерживаясь шести правил построения сетевого графика.

1) в начальное событие не входит ни одна стрелка, из конечного события не выходит ни одна стрелка;

2) события соединяют ориентированной стрелкой, которая направлена от предшествующего события к последующему (стрелка представляет собой на сетевом графике работу), также следует избегать взаимного пересечения стрелок;

3) события сетевого графика нумеруют так, чтобы для каждой работы номер начального события был меньше, чем номер конечного;

4) в сетевом графике не должно быть замкнутых контуров (циклов), т. е. путей, которые начинаются и заканчиваются в одном и том же событии;

5) в сетевом графике не должно быть тупиков, т. е. событий, из которых не выходит ни одна работа, за исключением завершающего события;

6) не должно быть хвостовых событий, т. е. событий, в которые не входит ни одна работа, за исключением начального события (рис. 2).

Далее можно рассчитать суммарную стоимость работ на каждом маршруте и суммарное время

Таблица 1

Характеристика работ

№ работы	Характеристика работы	Стоимость, руб.	Время, ч
(1, 2)	Затаможивание груза в Тель-Авиве	5400	3
(2, 3)	Оформление документов и погрузка на автомобильный транспорт в Тель-Авиве	300	1,5
(2, 4)	Оформление документов и погрузка на воздушный транспорт в Тель-Авиве	900	1,5
(3, 5)	Доставка автомобильным транспортом от Тель-Авива до Аазаза (Сирия)	5800	11
(3, 10)	Доставка автомобильным транспортом от Тель-Авива до Тбилиси (Грузия)	10 250	34
(4, 12)	Доставка воздушным транспортом от Тель-Авива до Москвы	38 203	4
(4, 19)	Доставка воздушным транспортом от Тель-Авива до Самары	43 302	4,5
(5, 6)	Прохождение таможенных операций в Аазазе (Сирия)	0	1
(6, 7)	Доставка автомобильным транспортом от Аазаза (Сирия) до Килиса (Турция)	352	0,5
(7, 8)	Прохождение таможенных операций в Килисе (Турция)	0	1
(8, 9)	Доставка автомобильным транспортом от Килиса (Турция) до Самсуна (Турция)	5790	13
(9, 16)	Оформление документов и перегрузка на судно в Самсуне (Турция)	500	2
(10, 11)	Растаможивание груза в Тбилиси (Грузия)	255 612	3
(11, 24)	Доставка автомобильным транспортом от Тбилиси (Грузия) до конечного пункта Самары	9800	34
(12, 13)	Растаможивание груза в Москве	255 612	3
(13, 14)	Оформление документов и перегрузка на автомобильный транспорт в Москве	300	2
(13, 15)	Оформление документов и перегрузка на ж/д транспорт в Москве	400	5
(14, 24)	Доставка автомобильным транспортом от Москвы до конечного пункта Самары	6018	13
(15, 20)	Доставка железнодорожным транспортом от Москвы до Самары	6544	17
(16, 17)	Доставка морским транспортом (Черное море) от Самсуна (Турция) до Новороссийска	12 360	21
(17, 18)	Растаможивание груза, оформление документов и перегрузка на автомобильный транспорт в Новороссийске	255 912	2
(18, 24)	Доставка автомобильным транспортом от Новороссийска до конечного пункта Самары	6666	30
(19, 21)	Растаможивание груза в Самаре	255 612	3
(20, 23)	Оформление документов и перегрузка на автомобильный транспорт в Самаре	300	2
(21 ,22)	Оформление документов и перегрузка на автомобильный транспорт в Самаре	300	2
(22, 24)	Доставка автомобильным транспортом от аэропорта Курумоч до конечного пункта Самары	800	2
(23, 24)	Доставка автомобильным транспортом от ж/д вокзала Самары до конечного пункта	800	1

каждого маршрута, складывая соответствующие показатели конкретных работ, входящих в маршрут. При этом значение приведенной стоимости работ можно найти по вышеприведенной формуле, учитывая, что изначальная стоимость груза составляет 710 400 руб. Например, для первого маршрута приведенная стоимость работ составит:

$$C^* = (710\,400 + 293\,080)*(1 + 0{,}15)^{0{,}0098} = 1\,004\,855{,}375.$$

При различных схемах доставки груза расчетные параметры суммарной стоимости работ перевозок, суммарное время маршрутов и интегральный показатель перевозок представлены в табл. 2.

Для сравнения полученных данных находим минимальные значения среди ключевых показателей, переводим полученные параметры в относительный вид и делим элементы каждого столбца на минимальное значение. Результаты проведенных вычислений представлены в табл. 3.

Далее для нахождения оптимального маршрута доставки в условиях неопределенности осуществляем поиск минимальных значений с помощью критериев Лапласа, Вальда, Сэвиджа и Гурвица.

Критерий Лапласа позволяет принять решение по перевозке груза для каждой схемы маршрута вычислением среднего арифметического значения потерь (M_i). Например, для первого маршрута:

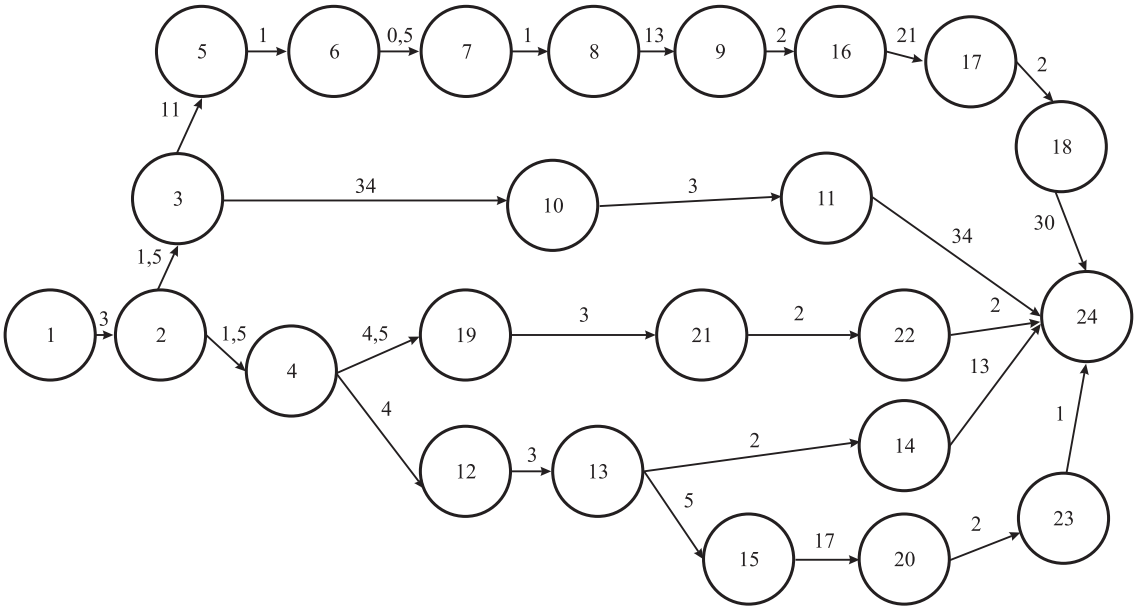


Рис. 2. Сетевая модель транспортного процесса

Таблица 2

Параметры для различных схем доставки

№	Схема доставки	Суммарная стоимость работ, С	Суммарное время маршрута, *T*	Интегральный показатель, С*
1	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 16, 17, 18, 24	293 080	3,5833	1 004 855,375
2	1, 2, 3, 10, 11, 24	281 362	3,1458	992 954,768
3	1, 2, 4, 19, 21, 22, 24	306 314	0,6666	1 016 974,072
4	1, 2, 4, 12, 13, 14, 24	306 433	1,1042	1 017 259,433
5	1, 2, 4, 12, 13, 15, 20, 23, 24	308 159	1,5208	1 019 152,797

$M_i = (1{,}0416 + 5{,}3755 + 1{,}0120)/3 = 2{,}4764$. При этом минимальное значение M_i будет соответствовать оптимальной схеме доставки.

Критерий Вальда позволяет определить оптимальную схему доставки с помощью минимаксного критерия, для этого требуется на первом этапе в каждой строке найти наибольший элемент, а затем среди них выбрать наименьший. Например, для первого маршрута наибольшее значение составит 5,3755, для второго — 4,7192.

Критерий Сэвиджа позволяет определить границы риска перевозок при помощи матрицы рисков, элементы которой определяются по формуле

$$r_{ij} = a_{ij} - \min a_{ij},$$

Таблица 3

Относительные значения параметров

№	Схема доставки	Суммарная стоимость работ, С	Суммарное время маршрута, *T*	Интегральный показатель, С*
1	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 16, 17, 18, 24	1,0416	5,3755	1,0120
2	1, 2, 3, 10, 11, 24	1	4,7192	1
3	1, 2, 4, 19, 21, 22, 24	1,0887	1	1,0242
4	1, 2, 4, 12, 13, 14, 24	1,0891	1,6565	1,0245
5	1, 2, 4, 12, 13, 15, 20, 23, 24	1,0952	2,2814	1,0264

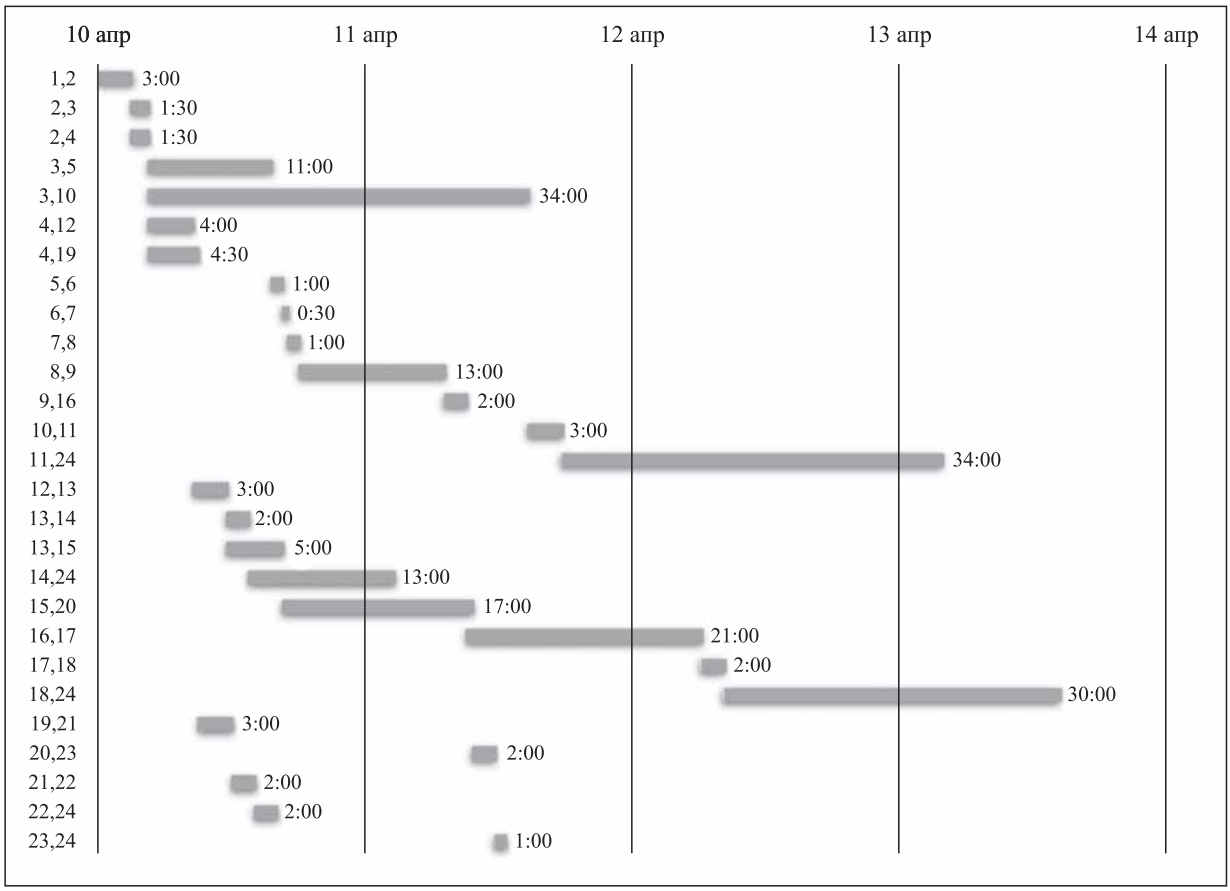


Рис. 3. Диаграмма Ганта

где a_{ij} — минимальный элемент в столбце исходной матрицы.

Например, для первого маршрута наибольший расчетный риск составит: $r_{11} = 1{,}0416 - 1 = 0{,}0416$; $r_{12} = 5{,}3755 - 1 = 4{,}3755$ (максимальное значение); $r_{13} = 1{,}0120 - 1 = 0{,}0120$.

Критерий Гурвица позволяет найти сумму произведений наименьшего и наибольшего значений риска, с использованием коэффициент доверия, который равняется 0,5 [5, с. 316]. Например, для первого маршрута он составит: $0{,}5 \cdot 1{,}0120 + 0{,}5 \cdot 5{,}3755 = 3{,}1937$.

Результаты расчетов перевозок груза с использованием всех критериев представлены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры перевозок для различных схем доставки

№	Критерий Лапласа	Критерий Вальда	Критерий Сэвиджа	Критерий Гурвица (a = 0,5)
1	2,4764	5,3755	4,3755	3,1937
2	2,2397	4,7192	3,7192	2,8596
3	1,0376	1,0887	0,0887	1,0443
4	1,2567	1,6565	0,6565	1,3405
5	1,4677	2,2814	1,2814	1,6539
min	1,0376	1,0887	0,0887	1,0443

Таким образом, проведенные расчеты позволяют определить, что оптимальным маршрутом перевозки груза из Тель-Авива до Самары является третий маршрут, при котором груз доставляется воздушным транспортом.

Одним из наиболее распространенных способов наглядного представления проекта перевозок во времени является линейный календарный график — Диаграмма Ганта [4, с. 14] (рис. 3).

Главным достоинством этого метода является возможность графически представить материал, четко выделить и обозначить этапы работы над проектом. Основным недостатком является трудность определения взаимосвязанных работ. Еще одним минусом диаграммы Ганта, как показывает практика, можно назвать ее негибкость. Ведь в наши дни проекты не являются статичными — в них постоянно происходят какие-то изменения, сдвиги, задержки, учесть которые в диаграмме просто невозможно.

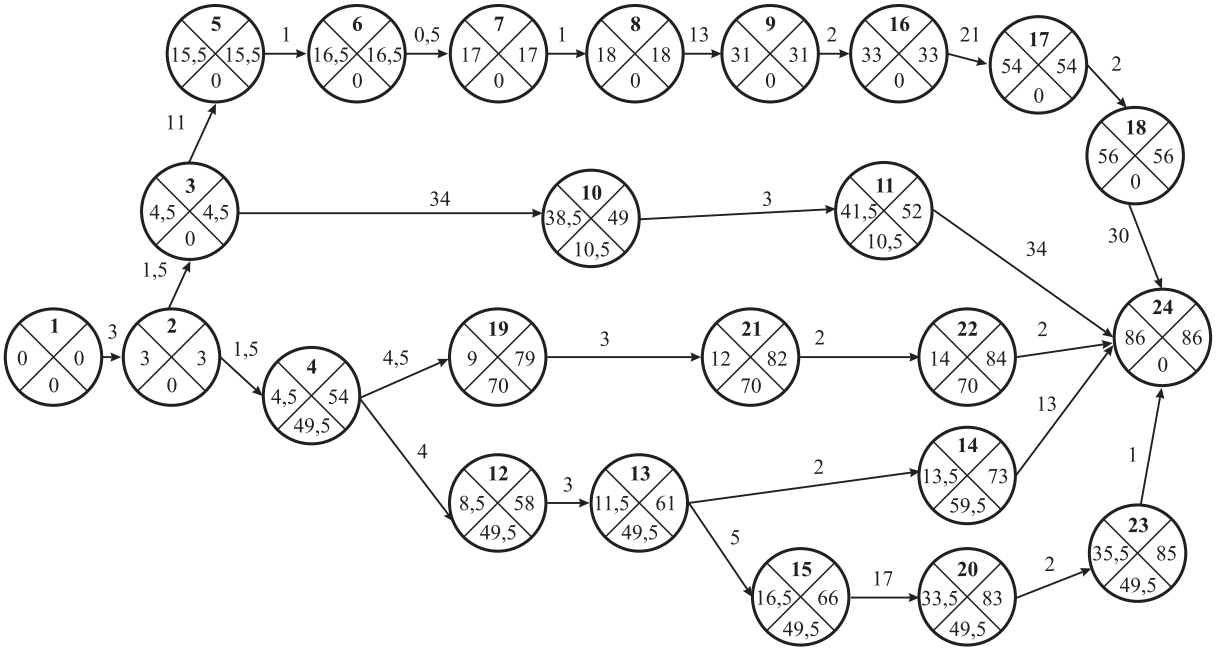


Рис. 4. Сетевой график с указанием времени наступления событий

Еще одним недостатком этого метода является невозможность проиллюстрировать несколько разных способов планирования за один раз.

Для вычисления наибольшей протяженности пути перевозки по времени последовательности событий от начального до завершающего, применяется метод критического пути. Ведь события, лежащие на критическом пути, не имеют резервов времени и в случае изменения их длительности, изменяются сроки всего проекта. Полученные результаты расчетов параметров сетевого графика продолжительности путей перевозки груза, представлены в табл. 5

Из табл. 5 видно, что критическим является путь 1 — продолжительностью 86 ч.

Важнейшим показателем сетевого графика являются резерв времени, который показывает, на какой допустимый период времени можно задержать наступление события, не вызывая при этом увеличения срока выполнения проекта. Для определения резервов времени событий сети рассчитываются наиболее ранние и наиболее поздние сроки наступления событий (рис. 4).

Таблица 5

Расчет параметров сетевого графика

№	Путь	Продолжительность пути, ч	Резерв времени, ч
1	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 16, 17, 18, 24	86	0
2	1, 2, 3, 10, 11, 24	75,5	10,5
3	1, 2, 4, 19, 21, 22, 24	16	70
4	1, 2, 4, 12, 13, 14, 24	26,5	59,5
5	1, 2, 4, 12, 13, 15, 20, 23, 24	36,5	49,5

Ранний срок наступления события — это время, необходимое для завершения всех работ, предшествующих рассматриваемому событию. Ранние сроки наступления событий рассчитываются от исходного к завершающему. Для этого определяется, какие работы входят в это событие, и складывается время, когда произошло предыдущее событие и длительность работы, исходящей из него и входящей в рассматриваемое событие. Из полученных сумм выбирается наибольшая. Таким образом, определив ранний срок наступления завершающего события сети, мы тем самым определяем длину критического пути. При этом ранние сроки располагаются слева в кружках событий.

Поздний срок наступления события — это время, на которое его можно задержать без срыва сроков всего проекта. Поздние сроки наступления событий рассчитываются от завершающего к исходному. Для этого анализируется, какие работы выходят из этого события, и находится разность между временем наступления последующего события и длительностью работы, входящей и выходящей из него. Из полученных разностей выбирается наименьшая. При этом поздние сроки располагаются справа в кружках событий.

Резерв времени события по данной методике определяется как разность между поздним и ранним сроками его наступления. Если резерв равен нулю, то работа является критической [6].

После того как определены наиболее ранние и поздние сроки наступления всех событий, можно рассчитать время выполнения всех работ:

1) ранний срок начала работ равен раннему сроку наступления предшествующего события;

2) ранний срок окончания работы равен сумме раннего начала работы и ее продолжительности;

3) поздний срок начала работы находится путем вычитания из позднего срока наступления последующего события продолжительности работы;

4) поздний срок окончания работы равен позднему сроку наступления последующего события.

Результаты расчетов временных параметров сетевого графика приведены в табл. 6.

Таким образом, с помощью метода критического пути мы определили, что оптимальным является третий маршрут, который имеет наибольший резерв времени, равный 70 ч.

Следует отметить, что основным достоинством метода критического пути является возможность манипулирования сроками выполнения задач, не лежащих на критическом пути.

Для определения ожидаемых сроков выполнения комплекса работ в сетевом планировании исполь-

Таблица 6

Расчет временных параметров сетевого графика

Код работы	Продолжительность	Ранние сроки		Поздние сроки		Резерв времени
		начало	окончание	начало	окончание	
(1, 2)	3	0	3	0	3	0
(2, 3)	1,5	3	4,5	3	4,5	0
(2, 4)	1,5	3	4,5	52,5	54	49,5
(3, 5)	11	4,5	15,5	4,5	15,5	0
(3, 10)	34	4,5	38,5	15	49	10,5
(4, 12)	4	4,5	8,5	54	58	49,5
(4, 19)	4,5	4,5	9	74,5	79	70
(5, 6)	1	15,5	16,5	15,5	16,5	0
(6, 7)	0,5	16,5	17	16,5	17	0
(7, 8)	1	17	18	17	18	0
(8, 9)	13	18	31	18	31	0
(9, 16)	2	31	33	31	33	0
(10, 11)	3	38,5	41,5	49	52	10,5
(11, 24)	34	41,5	75,5	52	86	10,5
(12, 13)	3	8,5	11,5	58	61	49,5
(13,14)	2	11,5	13,5	71	73	59,5
(13, 15)	5	11,5	16,5	61	66	49,5
(14, 24)	13	13,5	26,5	73	86	59,5
(15, 20)	17	16,5	33,5	66	83	49,5
(16, 17)	21	33	54	33	54	0
(17, 18)	2	54	56	54	56	0
(18, 24)	30	56	86	56	86	0
(19, 21)	3	9	12	79	82	70
(20, 23)	2	33,5	35,5	83	85	49,5
(21, 22)	2	12	14	82	84	70
(22, 24)	2	14	16	84	86	70
(23, 24)	1	35,5	36,5	85	86	49,5

зуются три оценки времени по методу оценки и пересмотра планов PERT [4, с. 27]:

— оптимистическая оценка (t_{min}) — минимальное время, необходимое для выполнения работы при самых благоприятных условиях;

— наиболее вероятностная ($t_{нв}$) — наилучшая оценка периода времени, необходимого для выполнения работы;

— пессимистическая оценка (t_{max}) — время, необходимое для выполнения работы при самых неблагоприятных условиях.

Допустим, что задан директивный срок $T_{дир}$ выполнения всего производственного процесса. Требуется определить вероятность выполнения производственного процесса в срок.

Продолжительность работы в этом случае рассматривается как случайная величина, которая в результате реализации может принять любое значение в заданном интервале. Такие оценки называются вероятностными (случайными), и их ожидаемое значение $t_{ож}$ определяется по формуле

$$t_{ож} = \frac{t_{min} + 4t_{нв} + t_{max}}{6}.$$

Для оценки степени неопределенности выполнения той или иной работы используется дисперсия (σ):

$$\sigma^2 = \left(\frac{t_{max} - t_{min}}{6}\right)^2.$$

Таблица 7

Определение временных оценок работ

№ работы	t_{min}	$t_{нв}$	t_{max}	Ожидаемая продолжительность $t_{ож}$	Дисперсия σ^2
1, 2	3	3	3	3	0
2, 3	1,5	1,5	1,5	1,5	0
2, 4	1,5	1,5	1,5	1,5	0
3, 5	10	11	14	11,333	0,44
3, 10	32	34	37	34,167	0,69
4, 12	4	4	4	4,	0
4, 19	4,5	4,5	4,5	4,5	0
5, 6	1	1	1	1	0
6, 7	0,5	0,5	0,5	0,5	0
7, 8	1	1	1	1	0
8, 9	12	13	15	13,167	0,25
9,16	2	2	2	2	0
10, 11	3	3	3	3	0
11, 24	34	34	34	34	0
12, 13	3	3	5	3,333	0,11
13, 14	2	2	2	2	0
13, 15	5	5	5	5	0
14, 24	11	13	16	13,167	0,69
15, 20	17	17	17	17	0
16, 17	20	21	23	21,167	0,25
17, 18	2	2	2	2	0
18, 24	29	30	31	30	0,11
19, 21	3	3	3	3	0
20, 23	2	2	2	2	0
21, 22	1	2	4	2,167	0,25
22, 24	2	2	2	2	0
23, 24	1	1	1	1	0

Таблица 8

Значения вероятностей в зависимости от аргумента нормальной функции распределения

x	$P(x)$	x	$P(x)$	x	$P(x)$	x	$P(x)$
0	0,5	1,6	0,945	−3,0	0,0013	−1,4	0,0808
0,2	0,579	1,8	0,964	−2,8	0,0026	−1,2	0,1151
0,4	0,656	2,0	0,977	−2,6	0,0047	−1,0	0,1587
0,6	0,726	2,2	0,986	−2,4	0,0082	−0,8	0,2119
0,8	0,788	2,4	0,992	−2,2	0,0139	−0,6	0,2743
1,0	0,841	2,6	0,995	−2,0	0,0228	−0,4	0,3446
1,2	0,885	2,8	0,997	−1,8	0,0352	−0,2	0,4207
1,4	0,919	3,0	0,999	−1,6	0,0548	0	0,5

Проведенный расчет временных оценок работ для различных схем доставки представлен в табл. 7.

Далее определяем аргумент функции нормального распределения X по формуле

$$x = \frac{T_{\text{дир}} - T_{\text{р}}}{\sqrt{\sum \sigma^2 K_{\text{р}}}},$$

где $T_{\text{р}}$ — ранний срок наступления конечного, завершающего события; $\sum \sigma^2 K_{\text{р}}$ — сумма дисперсий работ, лежащих на критическом пути [4, с. 27].

$$x = \frac{T_{\text{дир}} - T_{\text{р}}}{\sqrt{\sum \sigma^2 K_{\text{р}}}} =$$

$$= (88 - 86) \Big/ \sum \sqrt{\begin{pmatrix} 0 + 0 + 0,44 + 0 + 0 + 0 + \\ + 0,25 + 0 + 0,25 + 0 + 0 \end{pmatrix}} = 1,95.$$

Для определения вероятности завершения комплекса работ в заданный директивный срок используют значения функции распределения $P(x)$. Результаты расчета представлены в табл. 8.

Используя таблицу значений функции нормального распределения и метод интерполяции, определяем вероятность выполнения всего комплекса работ в заданный директивный срок:

$$P(x) = 0,964 + (1,95 - 1,8)\frac{0,977 - 0,964}{2 - 1,8} =$$

$$= 0,964 + 0,15 \cdot 0,065 = 0,97.$$

Таким образом, на основании проведенных расчетов комплекс работ будет выполнен в заданный директивный срок ($T_{\text{дир}}$ = 88 дней) с вероятностью 97 %.

Выводы

Проведенное исследование продемонстрировало возможности методов сетевого планирования для определения наиболее оптимального маршрута доставки. Однако важно помнить, что условия на рынке транспортных услуг постоянно меняются и эффективность различных вариантов доставки грузов может меняться с течением времени на данном маршруте. Поэтому во избежание кризисной ситуации целесообразно предусмотреть альтернативные схемы доставки, для чего сформировать собственную базу доставки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Абрамова И. Г.** Управление проектом на основе сетевых моделей: методические указания. — Самара, 2007. — 58 с.
2. **Болтова Я. С.** Моделирование транспортного процесса // Современные наукоемкие технологии. — 2013. — № 10-2. — С. 203—206.
3. **Денисов И. В.** Оптимизационное моделирование производственных процессов на предприятиях автомобильного транспорта: методические указания к лабораторным работам. — Владимир, 2012. — 72 с.
4. **Кудрявцев Е. М.** Microsoft Project. Методы сетевого планирования и управления проектом. — М., 2005. — 240 с.
5. **Лукинский В. С.** Модели и методы теории логистики: учебное пособие. 2-е изд. — СПб.: Питер, 2008. — 448 с.
6. **Метод** критического пути // URL: http://fb.ru/article/277323/kriticheskogo-puti-metod-put-kriticheskiy---chto-eto
7. **Рахмангулов А. Н.** Методы оптимизации транспортных процессов: учеб. пособие. — Магнитогорск, 1999. — 114 с.
8. **Сетевое планирование** // URL: http://www.inventech.ru/lib/glossary/netplan/

Художественный редактор *Д. С. Рыбакова*. Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *Е. В. Комиссарова*
Сдано в набор 25.04.2018. Подписано в печать 28.06.2018. Формат 60 × 88 1/8. Усл. печ. л. 5,88.
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**