Статья опубликована в электронном журнале Architecture and Engineering
Ссылаться на: Repin S, Evtiulov S, Rajczyk J (2016) Optimizing the service life of plant machinery and vehicles using information system for management of engineering status, *Architecture and Engineering* 1(2) :53–57

# ОПТИМИЗАЦИЯ СРОКОВ СЛУЖБЫ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ

Сергей Васильевич Репин[1], Сергей Аркадьевич Евтюков[2], Ярослав Райчык[3]

[1] д-р техн. наук, проф., профессор кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета
Email: repinserge@mail.ru

[2] д-р техн. наук, проф., декан автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета
Email: s.a.evt@mail.ru

[3] д.т.н., профессор, Ченстоховский политехнический институт

**Аннотация**

Статья содержит результаты исследований изменения показателей транспортно-технологических машин в процессе эксплуатации: наработки, затрат, выручки, прибыли, рентабельности. Показано, что снижение наработки и увеличение затрат по времени эксплуатации описывается экспоненциальным законом. На основании изменения показателей составлены математические модели для определения оптимальных сроков службы машин по экономическим критериям. Описано применение информационной системы для сбора и обработки данных для использования в моделях.
Применение разработанной методики определения оптимальных сроков службы будет способствовать рациональному формированию парков машин.

**Ключевые слова**

Транспортно-технологические машины, срок службы, эксплуатация, информационная система.

## Введение

Управление технической эксплуатацией сложных объектов, например, транспортно-технологических машин, представляет собой сложную многопараметрическую задачу, для помощи в решении которой разработан целый класс автоматизированных информационных средств — систем управления основными фондами (по западной классификации EAM-системы — Enterprise Asset Management). EAM-системы обеспечивают сбор и обработку эксплуатационной информации, автоматизируют процессы планирования технических обслуживаний и ремонтов, потребности в запчастях и других ресурсах. Одним из направлений развития EAM-систем является их интеллектуализация, заключающаяся в придании им возможности оптимизации производственных процессов за счет внедрения в информационные системы математических моделей, описывающих динамику основных параметров процессов.

На кафедре транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) разработаны математические модели оптимизации сроков службы техники (Repin, 2015; Репин м др., 2012). Использование этих моделей реализуется путем интеграции их с одной из лучших отечественных EAM-систем, программным комплексом (ПК) TRIM, разработанным специалистами НПП «СпецТек» (г. Санкт-Петербург) и адаптированным совместно с сотрудниками СПбГАСУ для условий эксплуатации транспортно-технологических машин (Репин и др. 2008).

Статья опубликована в электронном журнале Architecture and Engineering
Ссылаться на: Repin S, Evtiulov S, Rajczyk J (2016) Optimizing the service life of plant machinery and vehicles using information system for management of engineering status, *Architecture and Engineering* 1(2) :53–57

Интеграция возможна двумя методами: путем экспорта данных во внешний программный модуль; внедрением программного модуля непосредственно в TRIM. В качестве внешнего модуля может служить программа, реализованная в математической среде, например, Excel, Mathcad, Statistica и др., в которую экспортируется необходимая информация из ПК TRIM. Данный метод наиболее прост в реализации, но требует установки дополнительного программного обеспечения и обучения пользователей. Метод внедрения программного модуля непосредственно в TRIM связан с его доработкой, но обеспечивает наибольшее удобство пользователей, и поэтому представляется наиболее перспективным.

Разработаны модели оптимизации и прогнозирования сроков службы машин по различным параметрам – экономическим, техническим, экономическим, экологическим. В настоящей статье описывается использование наиболее востребованных – экономических моделей оптимизации сроков службы. Для анализа и прогнозирования нужны данные по наработке машин, выручке и затратам.

## Предмет, задачи и методы

Предметом исследования является ТТМ, технические и экономические показатели эксплуатации которой (надежность, производительность, затраты) изменяются в зависимости от срока службы.

Задача, решаемая в статье — разработка методов обоснования сроков службы машин на основании эксплуатационной информации.

Используются методы статистического анализа и прогнозирования.

## Результаты и обсуждение

### Описание моделей определения оптимальных сроков службы машин

Значения показателей изменяются по мере старения техники (Smith, 2003, Bujaczek, Slaviński, Grieger, 2013; 6. Shao-Fei Jiang, Da-Bao Fu, Si-Yao Wu, 2014; Репин, Зазыкин, Евтюков, 2016; Protasov, Nikolaychuk, 2011; Makhutov, Reznikov, 2015). Так, наработка машин падает вследствие увеличения времени простоев в ремонтах, а эксплуатационные затраты ($Z_{пер}$) растут с интенсивностью 1,5…4 % в год. Эти изменения достаточно хорошо (с адекватностью 0,88…0,92) описываются экспоненциальной зависимостью с параметром $\beta$=,012…0,048 год$^{-1}$ (Репин, Зазыкин, Евтюков, 2016) (параметр старения по наработке $\beta_t$ и по затратам $\beta_z$):

$$T_P(t) = T_P(1) \cdot \exp(\beta_t \cdot t), \quad (1)$$

$$Z_{пер}(t) = Z_{пер}(1) \cdot \exp(\beta_z \cdot t), \quad (2)$$

где $T_P(t)$, $T_P(1)$ — суммарная продолжительность периодов времени пребывания машины в работоспособном состоянии в $t$-й и первый год эксплуатации соответственно; $Z_{пер}(t)$, $Z_{пер}(1)$ — переменная составляющая затрат (эксплуатационные затраты); в t-й и первый год эксплуатации соответственно; $t$ — текущий возраст машины, год.

Основанием для расчета выручки $B(t)$ от эксплуатации машины служит ее наработка, определяемая суммарной продолжительностью периодов времени пребывания машины в работоспособном $T_P(t)$ в течение расчетного периода (года).

Возможны два основных варианта получения выручки:

предприятие-владелец техники сдает ее в аренду, тогда

$$B(t) = Ц_{маш\text{-}ч} T_P(t) \quad (3)$$

где $Ц_{маш\text{-}ч}$ — цена машино-часа аренды машины;

предприятие-владелец само использует технику для производства работ, тогда выручка будет связана с производительностью машины $Q(t)$, ценой единицы продукции $c$ и наработкой $T_P(t)$:

Статья опубликована в электронном журнале Architecture and Engineering
Ссылаться на: Repin S, Evtiulov S, Rajczyk J (2016) Optimizing the service life of plant machinery and vehicles using information system for management of engineering status, *Architecture and Engineering* 1(2) :53–57

$$B(t) = \sum Q(t) \cdot c \cdot T_P(t) \cdot k_u \,, \qquad (4)$$

где $k_u$ — коэффициент использования потенциала машины (рабочего времени, мощности, грузоподъемности и т.п.).

Затраты имеют весьма сложную структуру. В упрощенном виде состав затрат на содержание и эксплуатацию парка машин, можно представить выражением:

$$Z(t) = Z_{пост}(t) + Z_{пер}(t)\,. \qquad (5)$$

Первое слагаемое экономисты рассматривают как условно-постоянные затраты, не зависящие от количества выпущенной продукции (отработанных машино-часов) за расчетный период. $Z_{пост}(t)$ представляют собой в основном издержки владения техникой. Второе слагаемое — переменные затраты $Z_{пер}(t)$, возрастающие пропорционально объему продукции. Это затраты на эксплуатацию машины. Расчет затрат производится согласно нормативным документам. Так, для строительной и автотранспортной техники рекомендуется использовать «Методические указания» Госстроя России (ГОССТОРЙ РОССИИ, 1999).

Прибыль $П(t)$ рассчитывается как разница выручки $B(t)$ и затрат $Z(t)$:

$$П(t) = B(t) - Z(t)\,. \qquad (6)$$

Оптимальный срок службы машины может быть определен по минимуму удельных затрат, приходящихся на машино-час работы машины, максимуму удельной прибыли, заданному минимальному уровню рентабельности $R_{min}$.

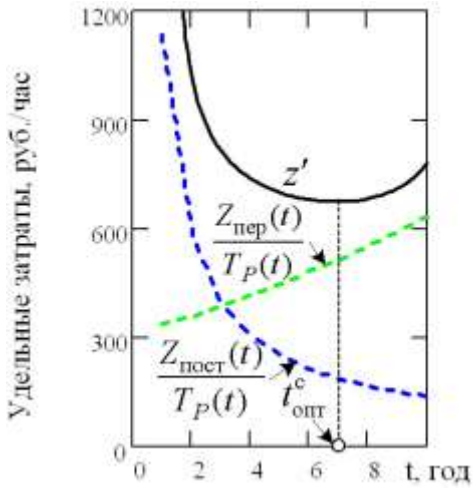



Рисунок 1. Изменение удельных затрат на эксплуатацию машины в зависимости от срока службы: $t^c_{опт}$ - оптимальный срок службы машины

Удельные затраты, приведенные к машино-часу эксплуатации определяются по формуле (рисунок 1):

$$z'(t) = \frac{Z_{пост}(t) + Z_{пер}(t)}{T_P(t)}\,. \qquad (7)$$

Рассмотрим динамику накопленной за срок службы машины прибыли. По мере старения машины значение выручки будет падать, т.к. согласно формуле (1) будет уменьшаться наработка машины в единицу времени. Затраты же будут возрастать в соответствии с выражением (2). В течение срока службы суммарная выручка $SB(t) = \sum B(t)$ и суммарные затраты $SZ(t) = \sum Z(t)$ составят суммарную (накопленную) прибыль от эксплуатации машины (рисунок 2, а):

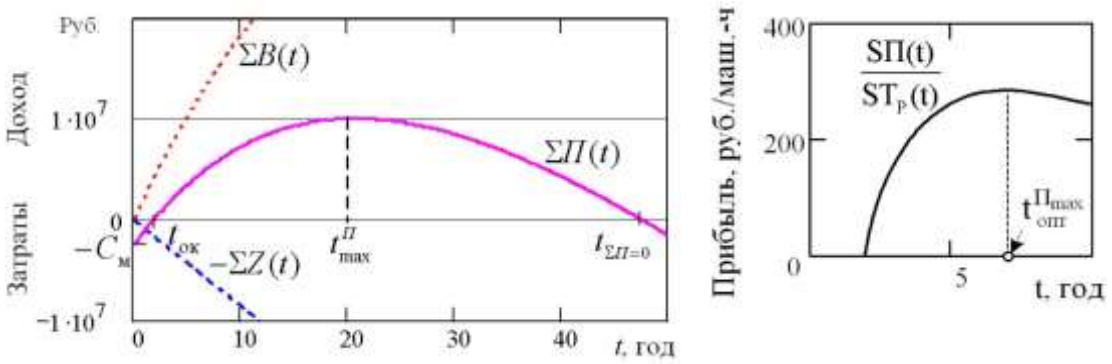
$$SП(t) = -См + SB(t) - SZ(t), \qquad (8)$$

где *См* — стоимость приобретения машины.

График суммарной прибыли SП(t) имеет четыре характерные точки в моменты времени: *0*, $t_{ок}$, $t^{П}_{\max}$ и $t_{SП=0}$ . При *t=0 SП(t)=-С*$_м$. До момента времени окупаемости $t_{ок}$ значение суммарной прибыли остается меньшим нуля. Максимума *SП(t)* достигает при $t^{П}_{\max}$ . В этот момент становятся равными величины годовых выручки и затрат. Эксплуатация машины должна быть прекращена ранее времени $t^{П}_{\max}$ . Дальнейшее использование машины будет приносить убыток, и к моменту $t_{SП=0}$ затраты на поддержание работоспособности старой машины «съедят» всю прибыль.

Статья опубликована в электронном журнале Architecture and Engineering
Ссылаться на: Repin S, Evtiulov S, Rajczyk J (2016) Optimizing the service life of plant machinery and vehicles using information system for management of engineering status, *Architecture and Engineering* 1(2) :53–57

Таким образом, оптимальный срок службы машины находится в интервале времени от $t_{ок}$ до $t^{П}_{\max}$. Более конкретно можно прогнозировать оптимальный срок службы по модели динамики удельной накопленной прибыли (рисунок 2, б).




а б

Рисунок 2. Динамика накопленной прибыли *SП(t)* (а) и удельной прибыли (б) за срок службы машины: *SB(t), SZ(t), ST$_P$(t)* — накопленные выручка, затраты и наработка; *C$_м$* — стоимость новой машины; $t_{ок}$ — строк окупаемости; $t^{П}_{\max}$ — срок службы по максимуму накопленной прибыли; $t_{SП=0}$ — срок службы, при котором затраты на поддержание работоспособности машины «съедят» всю прибыль; $t^{П_{\max}}_{опт}$ — оптимальный срок службы по максимальному значению удельной накопленной прибыли

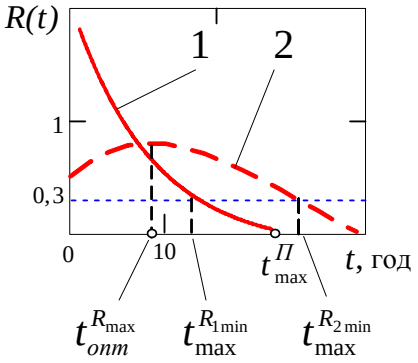



Рисунок 3. Определение срока службы по уровню рентабельности:

$t^{R_{1\min}}_{\max}$, $t^{R_{2\min}}_{\max}$ – срок службы по минимально допустимому нормативному уровню рентабельности (0,3); $t^{R_{\max}}_{опт}$ – оптимальный срок службы по максимальному уровню рентабельности *R$_{max}$*; линии 1 и 2 соответствуют равномерному и ускоренному (с коэффициентом два) методам расчета амортизационных отчислений

Дополнительную информацию по выбору срока службы может дать анализ уровня рентабельности эксплуатации машины:

$$R(t) = П(t)/Z(t) \geq R_{\min}, \qquad (9)$$

который является одним из основных экономических показателей. Задавшись нижним значением *R$_{min}$*, например 0,3 (рисунок 3), получаем максимальный срок службы $t^{R_{\min}}_{\max}$ по условию нижнего предела уровня рентабельности, который зависит от метода расчета амортизационных отчислений.

Модели определения сроков службы по минимуму удельных затрат и максимуму удельной прибыли (оптимальные значения примерно совпадают) целесообразно применять в случае наличия у эксплуатирующей организации средств для обновления парка машин. В этом случае можно будет выручить значительные суммы от продажи машины (рыночная стоимость снижается примерно на 20% в год от текущего значения рыночной стоимости). Модель минимума уровня рентабельности применима для предприятий, испытывающих дефицит средств для приобретения новой техники.

**Использование ПК TRIM для анализа и прогнозирования наработки машин**

Параметры $\beta_t$ и $\beta_z$ зависят от качества изготовления техники, условий эксплуатации и уровня совершенства системы технической эксплуатации (СТЭ) и для каждой единицы техники имеют свое определенное значение. Параметры $\beta_t$ и $\beta_z$ определяются на основе анализа статистической информации. Для сбора информации для расчета $\beta_t$ можно использовать ПК

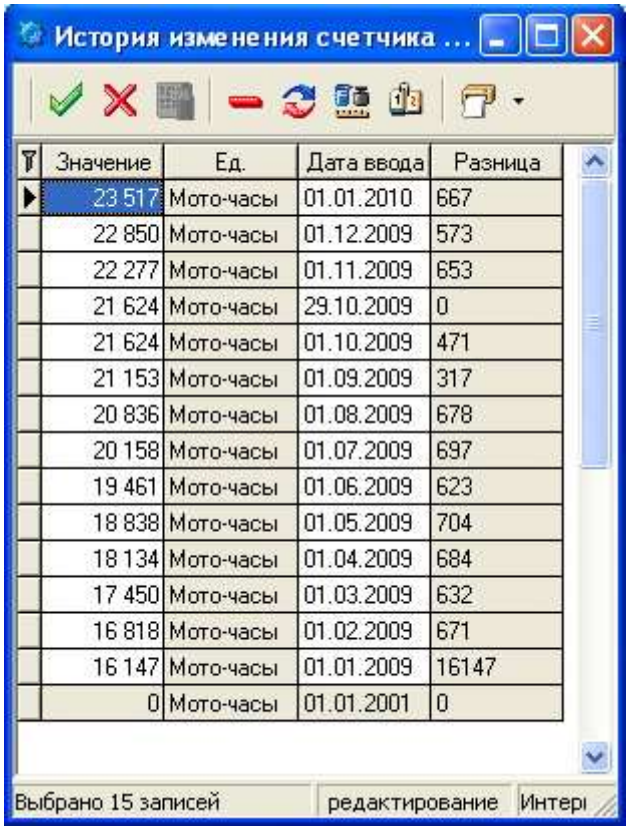
Статья опубликована в электронном журнале Architecture and Engineering
Ссылаться на: Repin S, Evtiulov S, Rajczyk J (2016) Optimizing the service life of plant machinery and vehicles using information system for management of engineering status, *Architecture and Engineering* 1(2) :53–57

TRIM (рисунок 4), для расчета затрат — данные бухгалтерии (Репин и др., 2008; Репин, Бондаренко 2012).

По собранным за период наблюдений *n* лет, например, пять лет значениям $T_p(t)$ из зоны анализа (рисунок 5), вычисляется среднее значение $\beta_{tcp}$:

$$\beta_{ti} = \frac{-\ln\left[T_P(i)/T_P(1)\right]}{i}, \quad \beta_{tcp} = \frac{\sum_{i=2}^{n} \beta_{ti}}{i}. \qquad (10)$$

По значению $\beta_{tcp}$ прогнозируется наработка в последующие годы. Аналогично определяется $\beta_{zcp}$. При наличии данных по нескольким однотипным машинам можно строить усредненный прогноз.




| Значение | Ед. | Дата ввода | Разница |
|---|---|---|---|
| 23 517 | Мото-часы | 01.01.2010 | 667 |
| 22 850 | Мото-часы | 01.12.2009 | 573 |
| 22 277 | Мото-часы | 01.11.2009 | 653 |
| 21 624 | Мото-часы | 29.10.2009 | 0 |
| 21 624 | Мото-часы | 01.10.2009 | 471 |
| 21 153 | Мото-часы | 01.09.2009 | 317 |
| 20 836 | Мото-часы | 01.08.2009 | 678 |
| 20 158 | Мото-часы | 01.07.2009 | 697 |
| 19 461 | Мото-часы | 01.06.2009 | 623 |
| 18 838 | Мото-часы | 01.05.2009 | 704 |
| 18 134 | Мото-часы | 01.04.2009 | 684 |
| 17 450 | Мото-часы | 01.03.2009 | 632 |
| 16 818 | Мото-часы | 01.02.2009 | 671 |
| 16 147 | Мото-часы | 01.01.2009 | 16147 |
| 0 | Мото-часы | 01.01.2001 | 0 |

Рисунок 4. Окно счетчика наработки в программном комплексе TRIM

Статья опубликована в электронном журнале Architecture and Engineering
Ссылаться на: Repin S, Evtiulov S, Rajczyk J (2016) Optimizing the service life of plant machinery and vehicles using information system for management of engineering status, *Architecture and Engineering* 1(2) :53–57

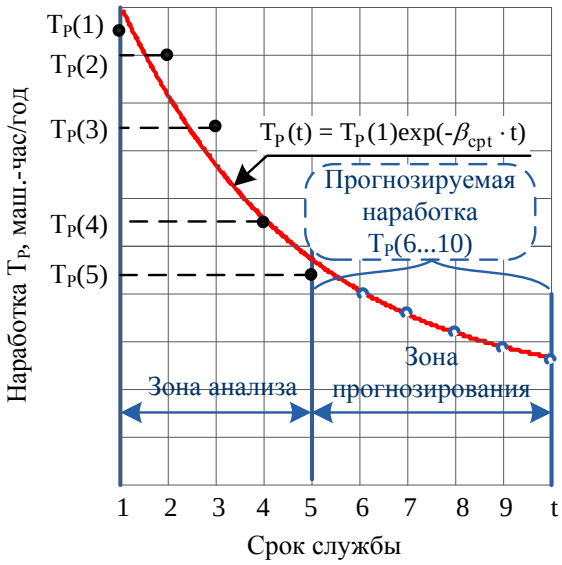



Рисунок 5. Схема к расчету $\beta_{tcp}$ и прогнозирования наработки

Для анализа удобно использовать передачу данных из TRIM в Excel. Результаты обработки данных в Excel приведены на рисунке 6.

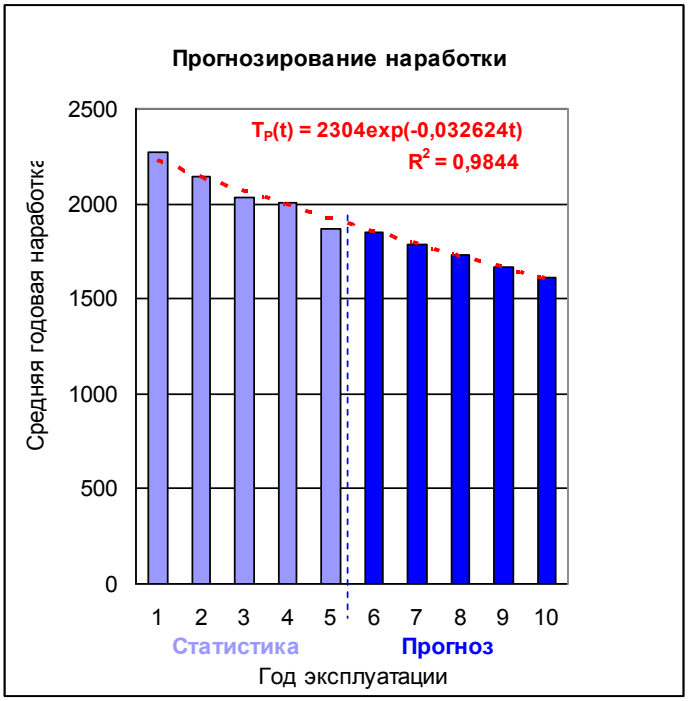



Рисунок 6. График изменения наработки и линия тренда

## Заключение

Представленная методика обработки эксплуатационной информации по наработке парка машин может служить основой для прогнозирования сроков службы не только машин, но и любых технических объектов. Ценность данной методики также заключается в том, что для прогнозирования требуется минимальное количество информации — наработка по периодам эксплуатации и эксплуатационные затраты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ в рамках научно-исследовательского проекта «Разработка методики формирования структурных элементов

транспортной системы по экономическим и надежностным критериям (на примере парков транспортно-технологических машин)», проект № 15-02-00512.

**Литература**

Bujaczek R, Sławiński K, Grieger A(2013) Agricultural Machines Maintenance And Repair Services In Western Pomerania. *Technical Sciences*, 16(1): 13–18.

Chernyavsky A, Shadchin A (2010) Evaluation of reliability of low damage probability calculations for unitary structures. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 39(4): 402–406.

Makhutov N, Reznikov D (2015) Application of scenario analysis in the assessment of structural reliability of complex technical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 44(8): 675–686.

Protasov A, Nikolaychuk O (2011) Applying the finite-element method for evaluating the reliability of mechanical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 40(1): 27–30.

Repin S (2015) Renewal Methods of Construction Machinery According to Technical and Economic Indicators. *Applied Mechanics and Materials*, 725–726: 990–995.

Shao-Fei Jiang, Da-Bao Fu, Si-Yao Wu (2014) Structural Reliability Assessment by Integrating Sensitivity Analysis and Support Vector Machine*. Mathematical Problems in Engineering*, 2014.

Smith P (2003) Valve Selection Handbook: Engineering Fundamentals for Selecting the Right Valve Design for Every Industrial Flow Application. Gulf Professional Publishing.

ГОССТРОЙ РОССИИ (Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу) (1999) МДС 81-3.99: Методические указания по разработке сметных норм и расценок на эксплуатацию строительных машин и автотранспортных средств. Госстрой России, Москва, РФ.

Репин СВ, Бондаренко АВ (2012) Оптимизация периодичности замен узлов транспортных и технологических машин на основе информации по динамике параметров их технического состояния. *Вестник гражданских инженеров*, 2(31), с. 236–243.

Репин СВ, Зазыкин АВ, Евтюков СС (2016) Надежность и эффективность транспортно-технологических машин. Издательский дом «Петрополис», СПб, РФ.

Репин СВ, Рулис КВ, Зазыкин АВ, Крупин СА (2012) Методология обеспечения работоспособности транспортно-технологических машин и комплексов средствами технической эксплуатации. Монография. СПбГАСУ, СПб, РФ.

Репин СВ, Рулис КВ, Зазыкин АВ, Ховалыг НК (2008) Методика применения информационной автоматизированной системы управления технической эксплуатацией строительных машин и автотранспорта. СПГАСУ, СПб, РФ.