

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-3-24-29

УДК 622.271.4: 621.879:62-587.5

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВОРОТНОГО РЕДУКТОРА КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

METHOD TO DETERMIN THE ACTUAL TECHNICAL CONDITION OF THE ROTARY GEAR OF OPEN CAST EXCAVATORS

Кудреватых Андрей Валерьевич¹,
канд. техн. наук, e-mail: kav.ea@kuzstu.ru
Andrey V. Kudrevatykh¹, C. Sc. in Engineering

Ащеулов Андрей Сергеевич¹,
канд. техн. наук, e-mail: ascheulovas@kuzstu.ru
Andrey V. Ashcheulov¹, C. Sc. in Engineering

Ащеулова Алена Сергеевна²,
канд. физ. мат. наук, e-mail: alena280383@rambler.ru
Alena S. Ashcheulova², C. Sc. in Physics and Mathematics

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

²Кемеровский государственный сельскохозяйственный институт, 650056, Россия, г. Кемерово, ул. Марковцева, д. 5

²Kemerovo State Agricultural Institute, 650056, Russia, Kemerovo Region, Kemerovo, Markovtseva St., 5.

Аннотация:

Россия занимает пятое в мире место по объему добычи угля и третье место в мире по экспорту. Более половины угля в России добывают в Кузбассе: 59% каменного угля и 77% коксующихся углей в России (по данным на 2018 год). Основным методом добычи угля в России является открытый, на него приходится приблизительно 75%, так как он является более чем в два раза экономически эффективнее шахтного метода. В связи с постоянным приростом объема добычи угля в России за последние пять лет средний ежегодный темп роста составляет 105%, остро стоит вопрос снижения себестоимости. Одним из резервов снижения себестоимости может служить внедрение новых способов повышения надежности узлов и агрегатов горнодобывающего оборудования. В результате проведенных исследований выявлено, что наибольшее время простоев приходится на поломки механической части: ковшей и редукторов. В данной работе предложен принципиально новый подход к проведению безразборной диагностики фактического технического состояния редукторов на основе системы «механизм-масло». При помощи корреляционно-регрессионного анализа экспериментальных данных получена зависимость температуры масла от наработки масла, применение которой позволяет без проведения разбора редуктора на основе показаний температурного датчика прогнозировать концентрацию механических примесей и выявить предотказное состояние редуктора, что позволит предотвратить простой техники.

Ключевые слова: масло, редуктор, диагностика, экскаватор, надежность.

Abstract:

Russia takes the 5th place in the world in coal production and the 3d in exports. More than half of coal in Russia is mined in Kuzbass: 59% of bituminous coal and 77% of coking coal (according to 2018 data). The main method of coal mining in Russia is surface mining, 75% of coal is mined by surface method, as it is more cost-

effective than the underground method more than in two times. Due to the constant increase in coal production in Russia, over the past five years the average annual growth rate is 105%, so the urgent issue is cost reduction. One of the ways to reduce costs may be the introduction of new ways to improve the reliability of components and units of mining equipment. By means of the conducted research, it was found out that the greatest down time is due to mechanical failures of buckets and gearboxes. In this paper, a fundamentally new approach to carry out in-place diagnostics of the actual technical condition of gearboxes based on the 'mechanism-oil' system is proposed. Using correlation-regression analysis of experimental data, the dependence of oil temperature on oil service hours has been obtained, the use of which allows without analyzing the gear on the basis of the temperature sensor readings to predict the concentration of mechanical impurities and to detect the pre-failure condition of a gear, which will prevent down time of equipment.

Key words: oil, gearbox, diagnostics, excavator, reliability.

При сравнении всех способов добычи полезных ископаемых лидирующую позицию занимает открытый способ благодаря таким показателям, как безопасность, экономичность и наибольшая производительность. Причем в ближайшем будущем такой вид добычи полезных ископаемых сохранит свое лидирующее положение. При применении различных методов по сокращению времени простоев горных машин и оборудования достигается уменьшение себестоимости продукции, значительное возрастание производительности работ карьерной техники и горнопромышленных комплексов [1].

Уменьшение времени простоев техники возможно реализовать за счет повышения долговечности и надежности горнодобывающих машин и агрегатов. Все простои рационально разделить на запланированные и незапланированные [5]. К незапланированным простоям машин можно отнести такие факторы, как отсутствие сервисных специалистов, отказы и аварии техники, а к запланированным – технологические перерывы. В связи с этим необходимо снижать незапланированные простои, особенно те, которые связаны с поломками. Данная проблема решается проведением предупредительных мероприятий, таких как периодические диагностики технического состояния узлов и агрегатов экскаваторно-автомобильного комплекса. Это связано с тем, что остановка одного экскаватора влечет за собой остановку ряда автосамосвалов, обслуживающих его, что приводит к остановке всей технологической линии по добыче угля. [3]

Проведенные исследования в ОАО «УК «Кузбассразрезуголь», направленные на выявления причин простоев экскаваторов, показали, что 8,12% простоев приходится на незапланированные [2], а значительная их доля приходится на отказы оборудования, свыше 50% которых произошли из-за выхода из строя механической части. Рассматривая причины простоев по разрезам, можно сделать вывод, что чаще всего поломки происходят с ковшами и редукторами. Изучая причины простоев автосамосвалов на предприятиях «Кузбассразрезуголь», можно сделать вывод, что из-за отказов поворотных редукторов потеряно 23% от общего времени простоев [6, 7, 9]. Проведенный анализ причин простоев горно-транспортного

оборудования показал необходимость внедрения мероприятий по предупреждению отказов редукторов или по уменьшению времени их ремонта.

На протяжении всего срока эксплуатации оборудования затраты на техническое обслуживание и ремонт в несколько раз превышают его начальную стоимость, что обусловлено низкой надежностью самого оборудования, таким образом, необходимо уделить большое внимание повышению надежности элементов горных машин. Внедрением дополнительной технологической операции в технологию ремонта и технического обслуживания достигается повышение использования ресурса горного оборудования и машин. Такой технологической операцией является диагностирование фактического состояния оборудования карьерной техники [2]. Существует большое количество различных методов диагностирования фактического состояния оборудования, но наиболее перспективным, информативным, а также наименее трудозатратным является метод диагностики на основе параметров работающего масла. Такой метод позволяет в динамике наблюдать за остаточным ресурсом диагностируемого оборудования, а также прогнозировать его выход из строя.

Исследования трения и износа в узлах и механизмах карьерной техники выявили множество факторов, влияющих на надежность: материалы, из которых изготовлены контактирующие поверхности; механические и физико-химические свойства смазки. В процессе эксплуатации масла в редукторах экскаваторов происходит его взаимодействие с трущимися деталями оборудования, в связи с этим происходят изменения физико-химических свойств смазки [8-11]. Ее химический анализ позволит одновременно следить за состоянием рабочих поверхностей узлов и механизмов машин, а также проводить оценку их работоспособности без разбора оборудования. На основе полученных данных создана математическая модель процессов, протекающих в масле, благодаря которой выявлены причины уменьшения надежности агрегатов.

Наравне с методом диагностики степени износа механизмов по показаниям физико-химического анализа работающего масла стоит метод безразборного определения технического состояния

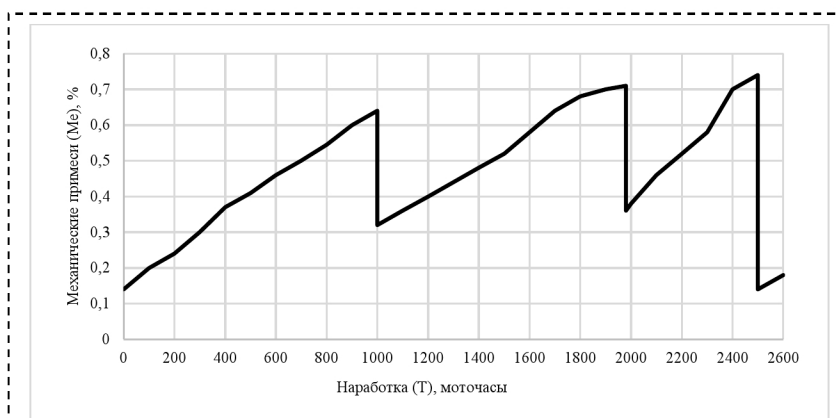


Рис. 1. Общая диаграмма содержания механических примесей в масле от наработки группы поворотных редукторов экскаваторов ЭКГ-5А
Fig. 1. General diagram of the mechanical impurities content in oil from the group of slewing gears operating time of excavators EKG-5A

по показаниям температуры смазывающего материала в процессе эксплуатации, локальные увеличения которой свидетельствуют о критическом состоянии контактирующих деталей, что говорит о необратимых изменениях внутри агрегата [10].

Таким образом, одновременное применение обоих методов диагностики позволяет своевременно выявить возникающие неисправности, при этом предотвратив незапланированный выход из строя карьерной техники.

При изучении системы «механизм-масло» необходимо учитывать множество факторов, влияющих на протекание процессов внутри этой системы, таких как особенности конструкции сопряженных деталей, режимных параметров эксплуатации оборудования, свойства используемого масла, а также ряд других факторов. При этом определяющие параметры подбираются для каждой системы индивидуально, а их критические значения выявляются опытным путем на основе многократных экспериментов, результаты которых заносятся в массив данных. Применение статистического анализа полученных значений позволит в дальнейшем предсказывать отказы узлов и агрегатов и в случае необходимости производить остановку эксплуатируемой техники.

Необходимо отметить, что масла, применяемые в узлах машин, циклично работают в технике, накапливая в себе параметры состояния системы «механизм-масло», которые позволяют диагностировать техническое состояние исследуемого агрегата [6]. Многократные исследования показали, что свойства масел изменяются гораздо быстрее, чем наступает отказ в технике. Данное явление обуславливается тем, что при развитии предотказного состояния в работающем масле увеличивается содержание металлических примесей (продуктов износа), вследствие чего возрастает температура, что ускоряет окислительные процессы, протекающие в масле и увеличивающие его вязкость.

Была проведена серия экспериментов, направленных на определение роста концентрации

механических примесей в работающем масле при эксплуатации поворотных редукторов экскаваторов. Оценка содержания элементов износа трущихся деталей производилась многоканальной фотометрической системой МФС-7. На основе ряда предварительных исследований была определена рациональная периодичность отбора проб масла, которая составила 50 моточасов работы экскаватора. Отбор проб масла производился с помощью шприца-отборника через отверстие для контроля уровня масла в поворотном

редукторе, после чего пробы отправлялись в лабораторию для анализа. Полученные результаты сводились в сводные таблицы, на основе которых строились сравнительные графики изменения концентрации механических примесей от наработки. Практически на всех графиках наблюдалась одинаковая форма кривой накопления продуктов износа, разница заключалась лишь в незначительном смещении линии относительно времени работы экскаватора. На рисунке 1 представлен общий график накопления металлических примесей (%) относительно наработки (моточасы).

На данном рисунке по вертикальной оси отложены накопления механических примесей в эксплуатируемом масле (в % содержании), а по горизонтальной оси – наработка поворотных редукторов экскаваторов (в моточасах). Экстремумы возникают из-за необходимости доливки трансмиссионного масла в исследуемый узел экскаватора, регламентируемые инструкцией технического обслуживания. При этом происходит значительное изменение соотношения примесей к общей массе масла, так как количество примесей остается неизменным в данный момент, а количество масла увеличивается. Из графика видно, что продукты износа трущихся деталей накапливаются в масле в течение эксплуатации, причем накопление в начале кривой до первого экстремума происходит не так интенсивно, как в последующих интервалах. Резкое снижение концентрации металлических примесей наработке в 2500 моточасов обусловлено регламентной заменой масла в редукторе.

По причине того, что возникает необходимость поддержания уровня масла путем его добавления, а также необходимость полной замены масла, согласно регламенту технического обслуживания экскаватора происходит искажение информативности показателей масла. Таким образом, для дальнейшего исследования свойств масел как показателя фактического состояния редуктора становится недостаточно. Поэтому вводится еще один

диагностический параметр – температура.

С целью определения влияния механических примесей в работающем масле проведена серия опытов. В поворотные редуктора экскаваторов ЭКГ-5А были установлены температурные датчики, которые передавали показания на компьютер. Измерения проводились в течение года, таким образом возможно выявить и влияние температуры окружающей среды на рост температуры масла в редукторе. На основе полученных данных построены диаграммы зависимости температуры (t) масла в редукторе от наработки (T), количество металлических примесей (Me) в масле от наработки экскаватора.

На рисунке 2 представлены зависимости в летний период.

Из графика видно, что с увеличением наработки (T) экскаватора равномерно возрастает как температура масла в редукторе, так и процентное количество металлических примесей (Me) в самом масле. При проведении повторных измерений наблюдалось аналогичное изменение температуры. Из написанного выше известно, что при регламентной замене масла в редукторе процентное содержание примесей резко уменьшается. Было сделано предположение, что на рост температуры оказывает влияние не наработка, а количество примесей.

При проведении корреляционно-регрессионного анализа параметров эксплуатируемого масла в редукторах экскаваторов за год была получена математическая модель зависимости температуры масла от наработки масла, металлических примесей в нем, а также от средней температуры окружающей среды (t_{oc}). Результаты корреляционного анализа представлены в таблице 1. По шкале Чеддока видно, что температура масла и

количество металлических примесей имеют прямую тесную связь, в то время как связь температуры масла с наработкой и температурой окружающей среды средняя, но также прямая. Влияние параметров наработки и температуры окружающей среды друг на друга отсутствует, так как эти два параметра протекают независимо друг от друга.

В результате регрессионного анализа получена математическая модель (1):

$$t = 14,98 + 0,005T + 118,39Me + 0,43t_{oc} \quad (1)$$

Данная математическая модель описывает изменение температуры масла в редукторе экскаватора ЭКГ-5А с достоверностью 96% и не учитывает лишь 4% факторов. Исследуя полученное уравнение, можно сделать вывод о том, что среднесезонная температура и наработка масла имеют незначительное влияние на температуру масла в отличие от количества металлических примесей, что подтверждает сделанное ранее предположение.

Выразив из уравнения (1) количество металлических примесей, получим

$$Me = \frac{t - 14,98 - 0,005T - 0,43t_{oc}}{118,39} \quad (2)$$

Применяя данную математическую модель при проведении диагностики экскаваторов, возможно спрогнозировать наличие количества примесей в работающем масле, что будет свидетельствовать о критическом износе, и, как следствие, о возникновении непредвиденного простоя. Такой комплексный метод диагностирования редукторов экскаваторов возможно реализовать и на другой карьерной

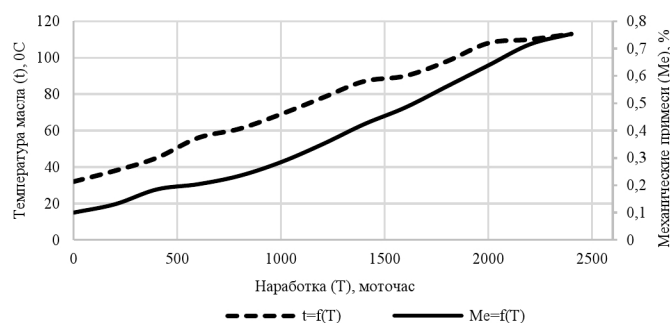


Рис. 2. Показатели работы редуктора экскаватора ЭКГ-5А в летний период
 Fig. 2. The operating indicators of the EKG-5A excavator gear in summer

Таблица 1. Коэффициенты корреляции

	Температура масла	Наработка	Металлические примеси	Температура окружающей среды
Температура масла	1			
Наработка	0,684	1		
Металлические примеси	0,967	0,686	1	
Температура окружающей среды	0,498	-1,6673E-17	0,377	1

технике с предварительным поведением серии экспериментов для выявления зависимости температуры масла и количества примесей.

Таким образом, предлагаемый метод комплексной диагностики узлов и механизмов горнодобывающей техники по параметрам эксплуатируемого масла позволяет выявлять фактическое техническое состояние поворотных редукторов экскаваторов, осуществлять постоянный контроль состояния масла, что в свою очередь позволит заранее избежать возможные отказы путем

своевременного ремонта агрегатов.

Результаты исследований, приведенные в статье, доказали преимущества комплексного подхода к диагностике узлов и механизмов эксплуатируемой техники. Вследствие этого необходима дальнейшая работа по усовершенствованию этого метода путем выявления дополнительных исследуемых параметров редукторов с целью более точного определения остаточного ресурса экскаваторно-автомобильных комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герике, Б.Л. Мониторинг и диагностика технического состояния машинных агрегатов: Учеб. пособие. – В 2-х ч. Ч. 1: Мониторинг технического состояния по параметрам вибрационных процессов / Кузб. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 1999 – 188с.
2. Бредихин, А.А. Современные технологии эксплуатации и обслуживания карьерного автотранспорта / А.А. Бредихин, Д.А. Нигматуллин // Горный журнал, 2007. – № 5. С. 40–43.
3. Гордиенко, Б.В. Повышение эффективности эксплуатации технологического автотранспорта на угольных разрезах / Б.В. Гордиенко, И.И. Полтавский, Г.П. Останин. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2001. – 166с.
4. Квагинидзе, В.С. Диагностика, техническое обслуживание и ремонт карьерного горно-транспортного оборудования в условиях низких температур // Дисс. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. – Кемерово, 2003. – 313с.
5. Соколов, А.И. Оценка работоспособности машин по параметрам работающего масла. Учеб. пособие / А.И. Соколов, Н.Т. Тищенко, В.А. Аметов. – Томск: Изд-во Томского университета, 1991. – 200с.
6. Фурман, А.С. О нормировании расхода топлива на карьерном транспорте / А.С. Фурман, Д.В. Стенин, В.Е. Ашихмин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2006. - № 1 (52). С. 125–127.
7. Хорешок, А.А. Определение оптимального соотношения сопряженных параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов / А.А. Хорешок, Д.В. Стенин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2007. - № 5 (63). С. 3–4.
8. Хорешок, А.А. Редуктор как объект диагностики / А.А. Хорешок, А.В. Кудреватых. – Энергетическая безопасность России: новые подходы к развитию угольной промышленности: Материалы XI Международной научно-практической конференции – Кемерово: ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, ИУУ СО РАН, КузГТУ, ЗАО КВК «Экспо-Сибирь», 2009. – С. 157–159
9. Basset D. Oil-soluble fluorinated compounds as antiwear and antifricition additives / D. Basset, M. Herman, J.M. Martin // ASLE Transactions. – 1984. – V. 27. – № 4. – P. 380–388.
10. Efremkov A.B. Coal mining machinery development as an ecological factor of progressive technologies implementation / A.B. Efremkov, A.A. Khoreshok, S.A. Zhironkin, A.V. Myaskov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017. – C. 012009.
11. Stenin, D.V. Evaluation of the open pit vehicles loading influence on the reliability of motor – wheel reducers / D.V. Stenin, N.A. Stenina, A.A. Bakanov // Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety, 2016.- C. 256–260.
12. Stenin D.V. Dependence of reliability and resource of the elements of the design of quarry automatics with the degrees of their downloads / D. Stenin, N. Stenina // E3S Web of Conferences, 2017.
13. Stenin D.V. Influence of service conditions of quarry dump trucks on the thermal state large-size tires / D.V. Stenin, A.G. Kulpin, Evgeniy E. Kultayev, E.E. Kulpina, Valeriy A. Borovtsov // Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety, 2016.- C. 116–119.
14. Sunqing Q. A review of ultrafine particles as antiwear additives and friction modifiers in lubricating oils / Q. Sunqing, D. Junxiu, Ch. Guoxu // Lubricating Science. – 1999. – V. 11. – № 3. – P. 165–172.

15. Zhironkin S.A. Economic and technological role of Kuzbass industry in the implementation of national energy strategy of Russian Federation / S.A. Zhironkin, G.A. Barysheva, A.A. Khoreshok, M.A. Tyulenev, M.C. Hellmer // *Innovative Technologies in Engineering*, 2016. – C. 12127.

REFERENCES

1. Gerike B.L. Machine units technical condition monitoring and diagnostics: Textbook. - In 2 parts. Part 1: Monitoring of the technical condition on the parameters of vibration processes / Kuzbass state technical university – Kemerovo, 1999 – 188p.
2. Bredikhin A.A. Modern technologies of operation and maintenance of open pit vehicles / A.A. Bredikhin, D.A. Nigmatullin // *Mining Journal*, 2007. – № 5. P. 40- 43.
3. Gordienko B.V. Improving the operation efficiency of technological vehicles on coal mines / B.V. Gordienko, I.I. Poltavsky, G.P. Ostanin. - Kemerovo: Kuzbassvuzuzdat, 2001. – 166p.
4. Kvaginidze V.S. Diagnostics, maintenance and repair of mining equipment at low temperatures // Thesis of doctor of tech. sciences degree. - Kemerovo, 2003. – 313p.
5. Sokolov A.I. Performance evaluation of machines according to the parameters of operating oil. Textbook / A.I. Sokolov, N.T. Tishchenko, V.A. Ametov. - Tomsk: Tomsk University Publishing House, 1991. – 200p.
6. Furman A.S. Rational consumption of fuel in open pit transport / A.S. Furman, D.V. Stenin, V.E. Ashikhmin // *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2006. - № 1 (52). P. 125–127.
7. Khoreshok A.A. Determination of the optimal ratio of conjugate parameters of mining excavator complexes / A.A. Khoreshok, D.V. Stenin // *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2007. - № 5 (63). P. 3–4.
8. Khoreshok A.A. Gear as an object of diagnosis / A.A. Khoreshok, A. V. Kudrevatykh. - Energy Security of Russia: New Approaches to the Development of the Coal Industry: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference - Kemerovo: NSC MP - CMI after A.A. Skochinsky, CCI SB RAS, KuzSTU, KSC Expo-Siberia, 2009. - P. 157–159
9. Basset D. Oil-soluble fluorinated compounds as antiwear and antifriction additives / D. Basset, M. Herman, J. M. Martin // *ASLE Transactions*. – 1984. – V. 27. – № 4. – P. 380–388.
10. Efremkov A.B. Coal mining machinery development as an ecological factor of progressive technologies implementation / A.B. Efremkov, A.A. Khoreshok, S.A. Zhironkin, A.V. Myaskov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017. – C. 012009.
11. Stenin D.V. Evaluation of the open pit vehicles loading influence on the reliability of motor – wheel reducers / D.V. Stenin, N.A. Stenina, A.A. Bakanov // *Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety*, 2016. - P. 256–260.
12. Stenin D.V. Dependence of reliability and resource of the elements of the design of quarry automatics with the degrees of their downloads / D. Stenin, N. Stenina // *E3S Web of Conferences*, 2017.
13. Stenin D.V. Influence of service conditions of quarry dump trucks on the thermal state large-size tires / D.V. Stenin, A.G. Kulpin, Evgeniy E. Kultayev, E.E. Kulpina, Valeriy A. Borovtsov // *Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety*, 2016.- C. 116–119.
14. Sunqing Q A review of ultrafine particles as antiwear additives and friction modifiers in lubricating oils / Q. Sunqing, D. Junxiu, Ch. Guoxu // *Lubricating Science*. – 1999. – V. 11. – № 3. – P. 165–172.
15. Zhironkin S.A. Economic and technological role of Kuzbass industry in the implementation of national energy strategy of Russian Federation / S.A. Zhironkin, G.A. Barysheva, A.A. Khoreshok, M.A. Tyulenev, M.C. Hellmer // *Innovative Technologies in Engineering*, 2016. – C. 12127.

Поступило в редакцию 09.06.2019
Received 09 June 2019