

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-633588>

Оригинальное исследование



Результаты исследования концентрации продуктов износа и загрязнения моторных масел дизелей и газовых двигателей

С.А. Утаев

Каршинский государственный университет, Карши, Узбекистан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Решение проблемы обеспечения надёжности двигателей внутреннего сгорания в процессе эксплуатации требует комплексного подхода, по разным направлениям. Указанные проблемы являются актуальными комплексными задачами. Основными среди них выделяют: условия эксплуатации, вид используемого топлива, контроль показателей моторных масел, а также разработку обоснованных сроков службы последних. При поддержке эксплуатационных свойств моторных масел двигателей, контроль основных характеристик работающего масла также является актуальным.

Цель работы — оценка накопления продуктов загрязнения и износа в масле М10Г2 дизельных и газовых двигателей на базе дизеля. Применение теоретических уравнений для оценки изменения концентрации продуктов загрязнения и проведения лабораторных анализов в целях оценки содержания продуктов загрязнения и износа, а также размера их частиц в составе масла.

Материалы и методы. Основным путём уменьшения повышенного износа и нагарообразования в двигателях является добавление присадок к маслу двигателя, способных нейтрализовать коррозионные и нагарообразующие действия сернистых продуктов сгорания топлива, т.е. обладающих высокими антиокислительными и моющими свойствами. Продукты органического и неорганического происхождения и механические примеси продуктов износа накапливаются в моторном масле в результате длительной эксплуатации. После первых 100 часов работы масла в нём содержатся определённые количества продуктов загрязнения и износа, а также нерастворимые продукты окисления и износа деталей двигателя.

В ходе исследований использовались законы теории смазки, методы планирования экспериментов и математической статистики, а также методы, базирующиеся на существующих нормативных документах. При обработке экспериментальных данных применялись методы обработки на прикладных пакетах Microsoft Office Excel.

Результаты. Рассмотрен процесс старения масла в двигателях внутреннего сгорания, а также факторы, влияющие на старение масла двигателя. С помощью аналитических уравнений производился расчёт изменения концентрации продуктов износа и загрязнения масла газового двигателя на базе дизеля, приведены графические зависимости показателей масла от продолжительности работы.

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в том, что с помощью теоретических уравнений можно оценить накопление продуктов загрязнения в составе масла, по результатам лабораторных анализов можно оценить концентрацию продуктов износа и загрязнения в составе масла. Эксплуатация дизеля и газового двигателя на базе дизеля в масле высокой концентраций загрязняющих примесей и продуктов износа ведёт к снижению надёжности двигателя, уменьшению ресурса смазывающего масла, ускоренному износу отдельных деталей, лакообразованию и осадкообразованию на отдельных деталях двигателя.

Ключевые слова: двигатель; загрязнение; концентрация; масло; надёжность; присадка; продукт; износ.

Как цитировать:

Утаев С.А. Результаты исследования концентрации продуктов износа и загрязнения моторных масел дизелей и газовых двигателей // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 6. С. 801–807. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-633588>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-633588>

Original Study Article

Results of the study of wear products and contamination percentage of engine oils of diesel and gas engines

Sobir A. Utaev

Karshi State University, Karshi, Uzbekistan

ABSTRACT

BACKGROUND: Solving the problem of ensuring the reliability of internal combustion engines during operation requires an integrated approach, solved in different directions. Solving these problems is a relevant complex task. The main issues are operating conditions, the type of fuel used, monitoring the indicators of engine oils, as well as the development of reasonable service life for the latter. When supporting the operational properties of engine oils, monitoring the basic characteristics of the operating oil is relevant.

OBJECTIVE: Assessment of the accumulation of contamination and wear products in the M10G2 oil of diesel engines and diesel-based gas engines. Use of theoretical equations for assessment of change in percentage of contamination products and conducting laboratory analyses aimed to assessment of content of contamination and wear products as well as particle size in the oil.

METHODS: One of the main ways to reduce increased wear and carbon formation in engines is blending additives to the engine oil that can neutralize the corrosive and carbon-forming effects of sulfur fuel combustion products, having high antioxidant and detergent properties. Products of organic and inorganic origin and mechanical impurities of wear products accumulate in motor oil as a result of long-term operation. After the first 100 hours of oil operation, it contains certain amounts of contamination and wear products, as well as insoluble products of oxidation and wear of engine parts. During the study, the laws of lubrication theory, methods of design of experiment and mathematical statistics, as well as methods based on existing regulatory documents were used. Processing methods in the Microsoft Office Excel application packages were used for processing of experimental data.

RESULTS: The process of oil aging in internal combustion engines and the factors influencing the aging of engine oil are considered. Using the analytical equations, changes in the concentration of wear products and contamination of the oil of a diesel-based gas engine are calculated, and graphical dependences of oil indicators on operating time are given.

CONCLUSIONS: The practical value of the study lies in the fact that, using theoretical equations, it is possible to assess the accumulation of contamination products in the oil; based on the results of laboratory tests, it is possible to assess the percentage of wear products and contamination in the oil. Operation of diesel and diesel-based gas engines with oil having high percentage of contaminants and wear products leads to reduced engine reliability, reduced lubricating oil lifespan, accelerated wear of individual parts, varnish formation and sedimentation on separate engine parts.

Keywords: engine; contaminants; percentage; oil; reliability; additive; product; wear.

To cite this article:

Utaev SA. Results of the study of wear products and contamination percentage of engine oils of diesel and gas engines. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(6):801–807. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-633588>

Received: 20.06.2024

Accepted: 31.12.2024

Published online: 31.12.2024

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы обеспечения надёжности двигателей внутреннего сгорания в процессе эксплуатации требует комплексного подхода, по разным направлениям. Указанная проблема является актуальной, комплексной задачей. Среди факторов выделяют условия эксплуатации, вид используемого топлива, контроль показателей моторных масел, а также разработку обоснованных сроков службы последних. При поддержке эксплуатационных свойств моторных масел двигателей, контроль основных характеристик работающего масла является также актуальным.

Исследованиями установлено, что от 40 до 45% всех отказов сельскохозяйственной техники приходится на долю двигателя.

Чтобы сроки замены масла были более продолжительными, масло в исходном состоянии должно иметь «запас качества», который позволил бы сохранить его достаточно высокие эксплуатационные свойства в течение длительного времени применения в двигателе [1–3].

Цель исследования состоит в оценке накопления продуктов загрязнения и износа в масле М10Г2 дизелей и газовых двигателей на базе дизеля. Применение теоретических уравнений для оценки изменения концентрации продуктов загрязнения. Проведение лабораторных анализов для определения концентрации продуктов износа и размер частиц.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследований использовались законы теории смазки, методы планирования экспериментов и математической статистики, а также методы, базирующиеся на существующих нормативных документах. При обработке экспериментальных данных применялись методы обработки на прикладных пакетах Microsoft Office Excel.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Продукты органического и неорганического происхождения и механические примеси продуктов износа накапливаются в моторном масле в результате длительной эксплуатации. После первых 100 часов работы масла, в нём содержатся определённые количества продуктов загрязнения и износа, а также нерастворимые продукты окисления и износа деталей двигателя [1–3].

В целях поддержания показателей масла в предельном значении и улучшения эксплуатационных свойств, к маслам добавляются различные добавки, т.е. ремонтно-восстановительные составы, присадки и трибомеханические стабилизаторы. Только совместное влияние физических свойств базового масла и присадок, составляющих композицию, определяет эксплуатационные свойства масла. Оно составляло 20% по отношению к базовому

маслу. Намечается тенденция к дальнейшему увеличению концентрации присадок в маслах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Накопление нерастворимых примесей в масле происходит как за счёт проникновения сажи, продуктов износа, посторонних веществ извне, так и за счёт образования продуктов окисления и термического разложения самого масла.

При работе изношенного двигателя скорость загрязнения масла увеличивается за счёт большего прорыва продуктов сгорания через поршневые кольца. Все это подтверждает ведущую роль топлива в процессе загрязнения масла.

Другим неизбежным источником загрязнения масла являются продукты износа деталей двигателя (железо, алюминий, медь, свинец, хром и др.). Металлические продукты износа частично растворяются в масле, образуя соединения типа мыл, а частично остаются в виде нерастворимых и повышается зольность масла.

В настоящее время считается установленным, что наиболее интенсивный износ двигателя вызывается крупными частицами продуктов износа. По мере роста теплонапряжённости двигателя происходит некоторое увеличение среднего размера частиц продуктов загрязнения. Причём число средних частиц составляет 85–90 % от общего числа частиц [5].

При оценке технического состояния деталей и узлов двигателей по содержанию продуктов износа в смазочном масле критерием может послужить концентрация металлов, по содержанию которых можно оценить техническое состояние двигателей в процессе эксплуатации.

Размер образующихся в масле частиц загрязнений при работе двигателя не остаётся постоянным, особенно при срабатывании присадок. Скорость накопления металлических частиц продуктов износа происходит медленнее, чем поступление углеродистых частиц.

Численное значение скорости изнашивания будет неодинаковым для различных типов двигателей и должно рассматриваться в связи с конструкцией, состоянием, режимом работы двигателя и качеством смазочного масла [3–5].

Эксплуатация газовых двигателей по сравнению с дизельными характеризуется значительным увеличением сроков службы моторных масел [3,4]. В продуктах сгорания газообразного топлива практически отсутствуют частицы твёрдого углерода, вызывающие дополнительный износ сопряжённых деталей двигателя. Отсутствие разжижения смазки и уменьшения количества нагара, попадающего из камеры сгорания в картер, позволяет увеличить срок службы моторного масла [3–5].

Для уменьшения интенсивности изнашивания деталей цилиндра-поршневой группы используются методы добавления в моторное масло функциональных присадок

в рабочем процессе дизеля, введённые присадки значительно увеличивают ресурсы моторных масел.

В теплонапряжённом режиме работа двигателя, по мере роста теплонапряжённости двигателя, происходит некоторое увеличение среднего размера частиц загрязнений. Напряжённость работы масла в двигателях внутреннего сгорания определяется по воспринимаемой им тепловой нагрузке. В свою очередь, она имеет определённые количественные выражения и характеризуется соответствующими показателями [6–8].

При работе двигателей в маслах активно развиваются термохимические процессы, приводящие к снижению их качества вследствие срабатывания присадок и накопления в маслах продуктов превращений (нерастворимые продукты — органические и неорганические кислоты, продукты износа и др.) [5].

В свежих моторных маслах механические примеси содержатся в количестве не более 0,015–0,02% содержание их определяют по ГОСТ 6370–2000 путём фильтрации, разбавленной бензином навески масла. Осадок на бумажном фильтре промывают бензином, высушивают, взвешивают и выражают примеси в процентах. Скорость загрязнения масла зависит от мощности двигателя, режима работы, от степени его изношенности, от качества применяемого топлива и масла.

Для количественного определения и анализа состава продуктов износа и загрязнений в масле могут применяться различные методы. Их можно разделить на две группы:

- определение химических элементов (металлов) в составе частиц износа и феррография
- контроль размеров и вида частиц, определяемых видом износа [9]. Для теоретической оценки содержания продуктов износа посвящён ряд исследований, в работе [9] предложено уравнение:

$$K = K_0 e^{\frac{At}{Q_0}} + \frac{g}{A} \left(1 - e^{-\frac{At}{Q_0}} \right)$$

где K_0 и K — начальная и текущая концентрации продуктов износа в смазочном масле, г/т; Q_0 — ёмкость масляной системы; g — интенсивность поступления продуктов износа, г/ч; A — предельное значение продуктов износа в масле г/ч; t — время эксплуатации агрегата после долива масла, ч.

$$A = g_{\phi} + g_y, \text{ г/ч;}$$

где g_{ϕ} — количество отложение на фильтре, г/ч; g_y — количество продуктов износа в составе угара масла, г/ч

Однако, здесь учитывается долив масла в систему, в нашем случае при работе на газообразном топливе долив масла не предусмотрена.

Для теоретических исследований можно использовать уравнений описывающие изменения концентрации

загрязнения масел [11]. Если содержание примесей выражается в %, то формула будет иметь вид [8–12]:

$$x = \frac{100a}{Q_y} \cdot \left(1 - e^{-\frac{Q_y \tau}{G}} \right), \quad (1)$$

где a — скорость поступления продуктов износа в масло, г/ч; Q_y — количества масла расходуемое на угар, г/ч; G — количества масла в системе, кг; T — время поступления продуктов износа в масло, ч.

Реальная скорость поступления загрязнений непосредственно в масло будет составлять, а $(1 - f)$. Тогда формула (1) примет вид [6, 7, 9]:

$$x = \frac{100a(1-f)}{Q_y} \left(1 - e^{-\frac{Q_y \tau}{G}} \right), \quad (2)$$

где f — коэффициент отфильтрования масла, a — скорость поступления загрязнения в масло, г/ч.

Помимо рассмотренных выше формул, рядом исследователей были предложены другие выражения зависимости содержания загрязнений в масле от времени работы двигателя и условий маслообмена. Так, например [3, 5, 12], для определения концентрации загрязнения предложена упрощённая формула:

$$x = \frac{a \cdot \tau}{G + Q_y \cdot \tau}, \quad (3)$$

Решая уравнение (3) относительно τ , получим выражение для определения времени, по истечении которого содержание примесей в масле достигает величины x [5]:

$$\tau = \frac{G}{Q_y} \cdot \ln \left(\frac{A}{A - x} \right), \quad (4)$$

а реальная скорость поступления загрязнений непосредственно в масло будет составлять, а $(1 - f)$. Тогда формула для определения содержания загрязнений примет вид [5]:

$$x = \frac{100a(1-f)}{Q_y} \left(1 - e^{-\frac{Q_y \tau}{G}} \right), \quad (5)$$

Формулы (1) и (5) являются основными для расчёта содержания загрязнения x в масле продуктами износа.

В результате лабораторных анализов выявлено, что продукты загрязнения и износа, содержащиеся в составе масла при использовании стандартного жидкого топлива и газообразного топлива, имеют частицы с различными величинами и формами (табл. 1).

Методика проведения исследования соответствует требованиям существующих стандартов и нормативно-правовых документов. По методике исследования после 100 мото-часов наработки отбирались пробы масел. Перед проведением лабораторных исследований пробы

Таблица 1. Результаты анализа оценки размеров частиц продуктов загрязнения при работе двигателей на дизельном и газообразном топливе

Продолжительность работы двигателя, мото-час	Размер частиц при работе на дизельном топливе, мкм		Размер частиц при работе на газообразном топливе, мкм	
	крупные	мелкие	крупные	мелкие
100	30	20	29	16
200	55	34	52	30
300	70	42	68	42
400	88	54	82	56
500	100	62	95	72

тщательно перемешивались и по стандартной методике определялись содержание продуктов износа и размер частиц, составляющих их.

В составе продуктов износа основная масса состоит из железа и способствует увеличению общей массы. Результаты анализа представлены в табл. 1.

Цель проведения лабораторных исследований по определения продуктов износа складывается из определения содержания продуктов износа в масле дизеля и газового двигателя для количественной оценки размер частиц в зависимости от наработки.

Продукты загрязнения с меньшими размерами при работе на дизельном топливе выявлены в виде графитообразных и смолистых веществ. В зависимости от времени работы двигателя, концентрация крупных частиц в моторном масле резко возрастает, а затем снижается.

Изменение формы и поверхностного покрытия деталей цилиндропоршневой группы двигателей и подобранных сочетаемые присадки в моторном масле, можно улучшить

смазывающие свойства масел на поверхности сопрягаемых деталей, с достижением рациональных характеристик изнашивания цилиндропоршневой группы двигателей.

По полученным результатам лабораторных анализов можно построить зависимость размеров частиц продуктов износа в масле от наработки двигателей, работающих на дизельном и газообразном топливе (рис. 1, рис. 2). Между размером частиц продуктов износа и наработки существует зависимость $x = f(T)$.

По росту наработки увеличивается размер частиц продуктов износа. Это явление связано с ухудшением смазывающих способностей масла в результате влияния различных факторов и срабатываемости присадок в составе масла.

При использовании дизельного топлива, с оптимальной концентрацией образовалось меньше лака, т.к. износ, уменьшается в меньшей мере (см. рис. 1).

Концентрация продуктов износа в составе смазочного масла, определяемая в лабораторных анализах, может

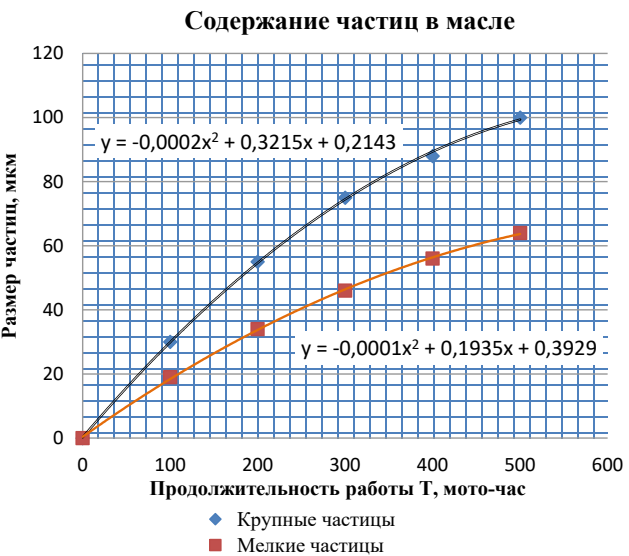


Рис. 1. Зависимость изменения размер частиц продуктов износа x в масле от наработки T при работе дизеля.
Fig. 1. Dependence of change of particle size x of wear products in oil on running hours T during diesel engine operation.

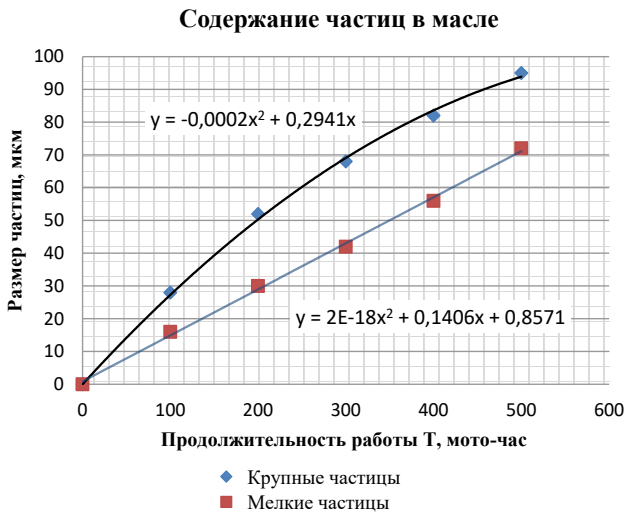


Рис. 2. Зависимость изменения размер частиц продуктов износа x в масле от наработки T при работе газового двигателя.
Fig. 2. Dependence of change of particle size x of wear products in oil on running hours T during gas engine operation.

иметь отклонения от средней величины в зависимости от характера методов измерения, технологии и периодичности отбора пробы в условиях эксплуатации двигателя, в зависимости режимов работы и т.д. На значение концентрации продуктов износа существенное влияние имеют условия эксплуатации, вид применяемого топлива и качества смазочного масла.

Для улучшения противоизносных характеристик масел рекомендуется введение противоизносных присадок или трибомеханических стабилизаторов в состав масла в условиях эксплуатации.

Опыт показал, что загрязняющие продукты в моторном масле состоят из частиц с металлической основой и частиц из органических соединений — лака, по структуре аналогичному графиту.

Как видно из результатов лабораторных анализов основная доля выхода приходится на железо — 26,0%, на кальций — 24,64%, магний — 2,86%, алюминий — 16,24%, натрий — 16,8%, калий — 6,16%.

ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам лабораторных исследований особый интерес представляло определение железа в составе масла. Кроме этого, в составе масла двигателей в определённом количестве встречаются такие металлы как кальций, магний, алюминий, натрий, калий, что составляет концентрацию продуктов износа.

Теоретические уравнения способствуют оценке содержания загрязняющих примесей продуктов износа в зависимости от продолжительности работы масла. Для уменьшения количества продуктов износа к маслам рекомендуется добавление противоизносных присадок и трибомеханических стабилизаторов. Введение трибомеханических стабилизаторов в масло М10Г2 газового двигателя влияет на улучшение эксплуатационных показателей, незначительно уменьшает содержание загрязняющих примесей и количество продуктов износа:

- По содержанию продуктов износа в масле можно судить о величине износе деталей двигателя. Повышение концентрации продуктов износа и размер частиц по сравнению предельными значениями свидетельствует об ухудшении противоизносных свойств масла.
- Методика и периодичность отбирания проб масел должно соответствовать стандартным методам исследований.
- Качество фильтрации масла влияет на концентрацию продуктов износа в масле.
- По элементарному составу продуктов износа можно судить об износе отдельных деталей двигателя.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад автора. Автор подтверждает соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (автор внёс существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочёл и одобрил финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Author's contribution. The author made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agrees to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The author declares that he has no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Altshuler MA, Vipiper AB, Zhurba AS. Kinetic study and prediction of the response of alkaline properties of motor oils. *Chemistry and technology of fuels and oils*. 1980;10:27–29. (In Russ.)
2. Arabyan SG, Vipiper AB, Kholomonov IA. *Oils and additives for tractor and combine engines*. Moscow: Mashinostroenie; 1984. (In Russ.)
3. Venzel SV. *The use of fuels and lubricating oils in automobile and tractor engines*. Moscow: Mashinostroenie, 1985. (In Russ.)
4. Grigoriev MA. *Engine oil quality and parts reliability*. Moscow: Mashinostroenie; 1981. (In Russ.)
5. Morozov GA, Artsimov OM. *Diesel oil cleaning*. Leningrad: Mashinostroenie; 1971. (In Russ.)
6. Musurmanov RK, Utaev SA. Mathematical modeling of changes in the physical and chemical properties of gas engine oils. *Earth and Environmental Science*. 2021;868. doi: 10.1088/1755-1315/868/1/012044
7. Musurmanov RK, Utaev SA. Ecological impact and results of the study of motor oils of internal combustion engines by conducting tribomechanical stabilizers. *Earth and Environmental Science*. 2022;1112. doi: 10.1088/1755-1315/1112/1/012146
8. Musurmanov RK, Utaev SA. Study of the influence of oil consumption and changes in key indicators during the operation of diesel and gas engines. *E3S Web of Conferences*. 2023;443. doi: 10.1051/e3sconf/202344304015
9. Sergeev KO. Analysis of oil for the content of wear products as a method for diagnosing the technical condition of a ship gearbox. *Bulletin ASTU. Ser.: Marine engineering and technology*. 2020 1:13–21. (In Russ.)

10. Utaev SA Results of the analysis of the continuous introduction of additives into the lubrication system of an engine running on gaseous fuel. *Tractors and Agricultural Machinery*. (In Russ.) 2019;3:76–80. doi: 10.31992/0321-4443-2019-3-76-81 EDN: IFCRDH

11. Utaev SA Results of calculating changes in the concentration of pollution and alkalinity of motor oils of gas engines.

Tractors and Agricultural Machinery. (In Russ.) 2023;3:265–271. doi: 10.17816/0321-4443-321243 EDN: KVBMJU

12. Chudinovskikh AL Development of scientific foundations for chemical evaluation of automobile motor oils [dissertation]. Moscow; 2016. (In Russ.)

ОБ АВТОРЕ

Утаев Собир Ачилович,

канд. техн. наук,

доцент кафедры «Промышленный инжиниринг»;

адрес: Республика Узбекистан, 180103, Карши,

ул. Кучабог, д. 17;

ORCID: 0000-0003-0377-8929;

eLibrary SPIN: 6478-8885;

e-mail: utaev.s@list.ru

AUTHOR'S INFO

Sobir A. Utaev,

Cand. Sci. (Engineering),

Associate Professor of the Industrial Engineering Department;

address: 17 Kuchabog st, Karshi, Republic of Uzbekistan, 180103;

ORCID: 0000-0003-0377-8929;

eLibrary SPIN: 6478-8885;

e-mail: utaev.s@list.ru