

Зырянова Светлана Анатольевна (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Информационные технологии ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: svetazyr55@mail.ru).

Zyryanova Svetlana Anatolyevna (Russian Federation, Omsk) – candidate technical sciences, Ass. Professor, The Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira, 5, e-mail: svetazyr55@mail.ru).

Филимонова Ольга Алексеевна (Омск, Россия) – старший преподаватель кафедры Информационные технологии ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: deryabina@mail.ru).

Filimonova Olga Alekseevna (Russian Federation, Omsk) – Senior Lecturer, The Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Omsk, Mira, 5, e-mail: deryabina@mail.ru).

УДК 621.879

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ГИДРОПРИВОДА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ КОПАНИЯ ОДНОКОВШОВОГО ЭКСКАВАТОРА

В.В. Савинкин¹, В.Н. Кузнецова²

¹ ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск;

² Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева,
г. Петропавловск, Казахстан.

Аннотация. Технологические возможности такой землеройной машины, как экскаватора, зависят от мощности силовой установки, вида рабочего оборудования, вместимости ковша и системы его привода. Показателями эффективности работы экскаватора являются производительность, КПД гидропривода, затрачиваемая мощность на единицу объема разрабатываемого грунта, экономичность, минимальное время рабочего цикла и состояние гидропривода. В статье представлены результаты исследований внутренней энергии гидропривода, понимание которой интерпретировалось через принцип распределения мощности гидропривода и силовой установки. Установлены наиболее энергоемкие операции, вызывающие перенапряжение элементов силовой установки и гидропривода. Предложенная научная концепция повышения энергоэффективности одноковшового экскаватора через перераспределение мощности позволила расширить базу знаний в области эффективности эксплуатации землеройных машин.

Ключевые слова: одноковшовый экскаватор, энергоэффективность, мощность, гидропривод, энергоемкость.

Введение

В процессе исследования энергоэффективности экскавации грунтовой среды экскаватор рассматривался как сложная иерархическая система, включающая основные подсистемы силовая установка, рабочее оборудование и гидропривод. При эксплуатации экскаватора гидропривод должен обеспечить мощность, достаточную для преодоления всех сопротивлений, возникающих в исполнительных механизмах при энергонапряженных режимах копания. При этом наибольшая часть силы копания расходуется на резание грунта и перемещение собственных масс. Таким образом, сопротивление грунта резанию доминирует в составе суммарного рабочего

сопротивления землеройных машин [1-4]. Значит, при выполнении земляных работ актуально повторно использовать энергию потока рабочей жидкости и эффективно перераспределять мощность по элементам экскаватора в соответствии с энергоемкостью операций. Следовательно, цель исследований заключается в оптимизации эксплуатационных и технологических параметров систем одноковшового экскаватора, влияющих на снижение энергоемкости процессов.

Результаты теоретических и практических исследований

Один из основных показателей эффективности работы гидропривода – его КПД. Производство КПД гидромашин, или отношение полезной мощности гидропривода

(гидродвигателя) к затрачиваемой мощности гидропривода (насоса), характеризует КПД гидропривода в целом. Рассмотрим

энергетическую структуру гидропривода с учетом основных элементов системы (рис. 1).

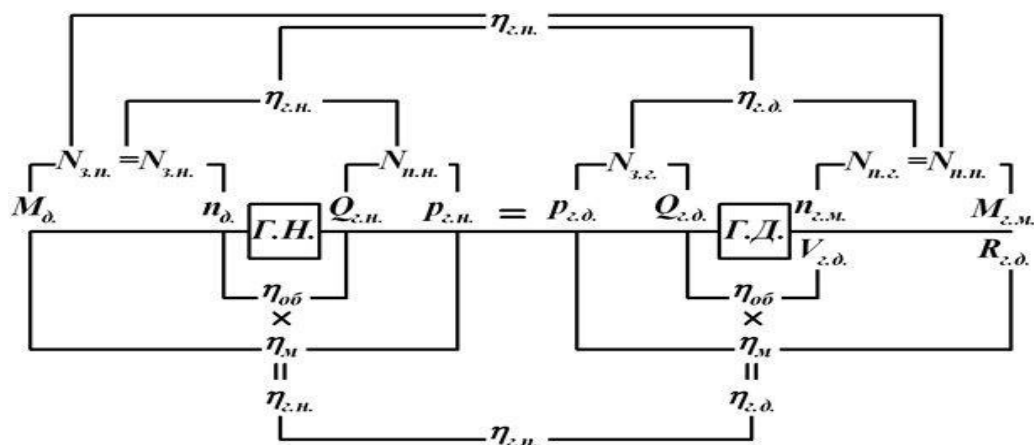


Рис. 1. Энергетическая структура объемного гидропривода

Энергетическая структура объемного гидропривода описана с учетом следующих параметров: Г.Н. и Г.Д. – гидронасос и гидродвигатель; $M_д.$ и $n_д.$ – момент и частота вращения вала гидронасоса; $Q_{з.н.}$ и $P_{з.н.}$ – подача и давление на выходе гидронасоса; $Q_{з.д.}$ и $P_{з.д.}$ – расход и давление на выходе гидродвигателя; $M_{з.м.}$ и $n_{з.м.}$ – крутящий момент и частота вращения вала гидромотора; $R_{з.ц.}$ и $V_{з.ц.}$ – сила и скорость перемещения штока гидроцилиндра; $N_{з.н.}$ и $N_{п.н.}$ – затрачиваемая и полезная мощности гидронасоса соответственно; $N_{з.д.}$ и $N_{п.д.}$ – затрачиваемая и полезная мощности гидродвигателя соответственно; $N_{з.п.}$ и $N_{п.п.}$ – затрачиваемая и полезная мощности гидропривода соответственно; $\eta_{об.}$ и $\eta_{м.}$ – объемный и механический КПД гидромашин; $\eta_{з.н.}$ и $\eta_{з.д.}$ – общий КПД гидронасоса и гидродвигателей; $\eta_{з.п.}$ – КПД гидропривода.

Разработанная математическая модель процесса копания грунта (внедрение, подъем и опускание) [5] позволила установить наиболее энергоемкую операцию в разных точках позиционирования рабочего оборудования. По результатам теоретических исследований [4-6] обнаружено, что в динамической модели рабочего оборудования экскаватора наиболее сложными для интерпретации являются энергонапряженные переходные процессы. Исследование процесса изменения мощностных и силовых характеристик гидропривода позволит обосновать

закономерность распределения внутренней энергии по его гидроэлементам в соответствии с выполняемой работой, формирующей удельную энергоемкость процесса копания.

Значит, управляя траекторией движения оборудования на основе эффективного перераспределения мощности, можно изменять энергоемкость процесса копания, а, следовательно, и адаптировать его к удельным затратам. Как ранее отмечено, важным показателем эффективности работы экскаватора является удельная мощность гидропривода на единицу вместимости ковша. Поэтому с целью проектирования рабочего оборудования получены зависимости между геометрическими параметрами ковша экскаватора и мощностными характеристиками гидропривода:

$$B_K = 0,930 \cdot \sqrt[3]{N_{ном}^{еп}} - 1,211, \quad (1)$$

где B_K – ширина ковша; $N_{ном}^{еп}$ – номинальная мощность гидропривода.

Таким образом, геометрия ковша определяет условия энергоэффективной работы гидроцилиндров рабочего оборудования, а также предопределяет технические и технологические параметров гидропривода и его элементов при наполнении грунтом.

Энергоемкость процесса копания при работе рукояти оценим удельной энергией, затраченной на единицу разрабатываемого грунта:

$$E = \frac{A_{1-5} \cdot t_{пов}}{q_k} \quad (2)$$

В исследованиях выполняемая работа интерпретируется через силовые характеристики гидроцилиндра, зависящие от давления в гидроприводе. Значит,

необходимо установить зависимости между основными параметрами экскаватора при взаимодействии с разрабатываемым грунтом (рис. 2, 3).

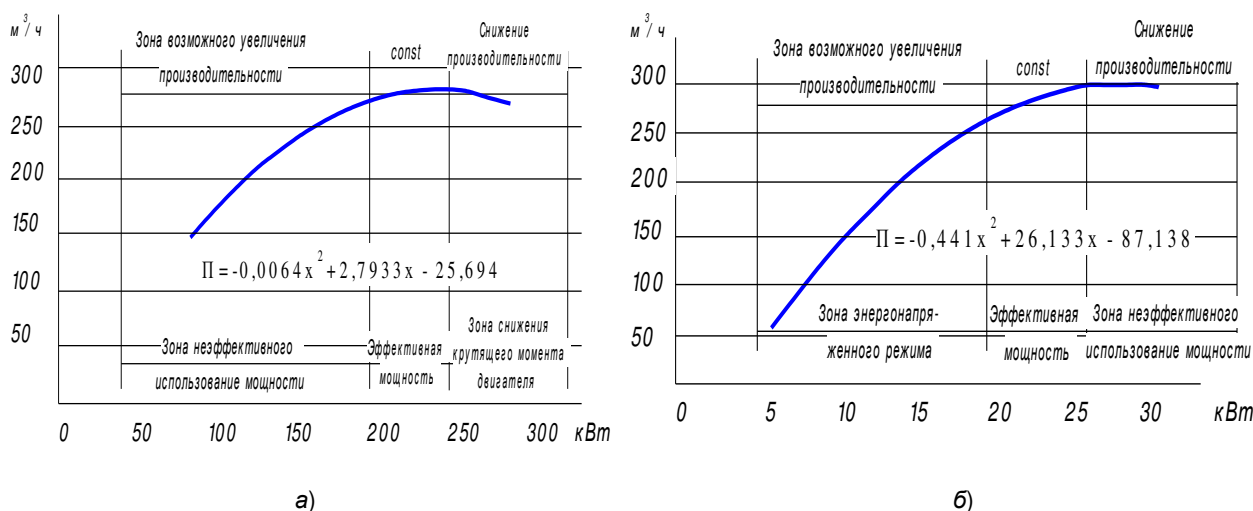


Рис. 2. Графики зависимости производительности экскаватора от затрачиваемой мощности: а) двигателя и б) гидропривода

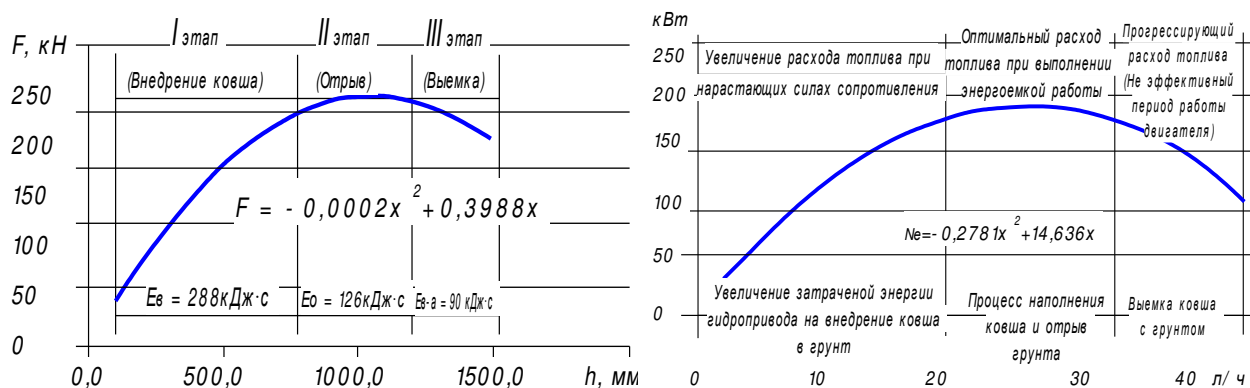


Рис. 3. Зависимости основных технологических параметров экскаватора от силовых и мощностных характеристик его систем

На рисунке 2 представлены установленные функциональные зависимости производительности от мощности гидропривода $\Pi_3 = 0,441 + 26,13 N_{e.п.} - 87,14$ и мощности двигателя $\Pi_3 = 0,0064 N_e^2 + 2,79 N_e - 25,694$. Анализируя зависимости установлено, что сила копания ковшем возрастает до значений $R_k = 200-230$ кН и пропорциональна мощности гидропривода $N_{e.п.} = 21-25$ кВт. Взаимодействие силовой установки и гидропривода обеспечивает

установившуюся производительность экскаватора $\Pi_3 = 280$ м³/ч, соответствующую оптимальным энергетическим затратам (см. рис. 2). По результатам исследования разработана номограмма изменения мощностных характеристик гидропривода $N_{e.п.}$ и силовой установки N_e от реакции силы копания $F_{ковш}$ при различных положениях ковша $S_{п.гц.к}$ (рис. 4).

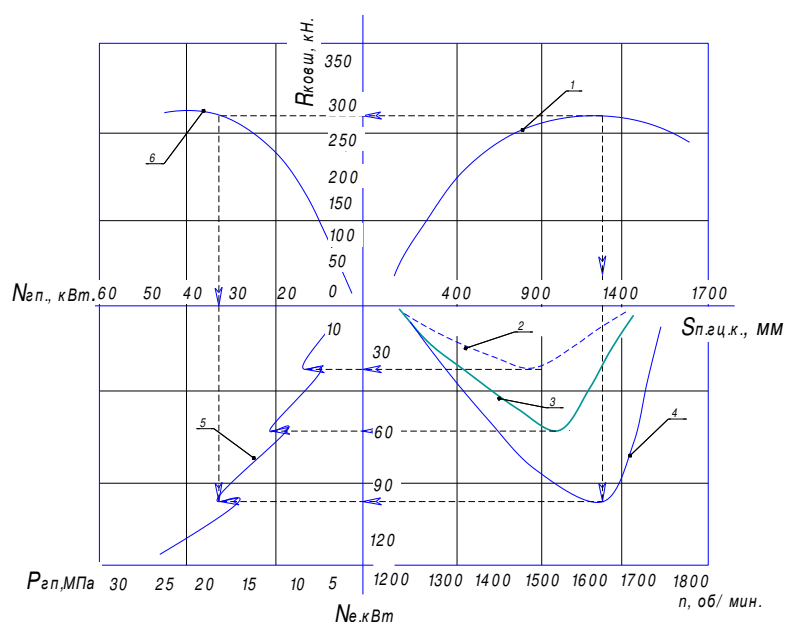
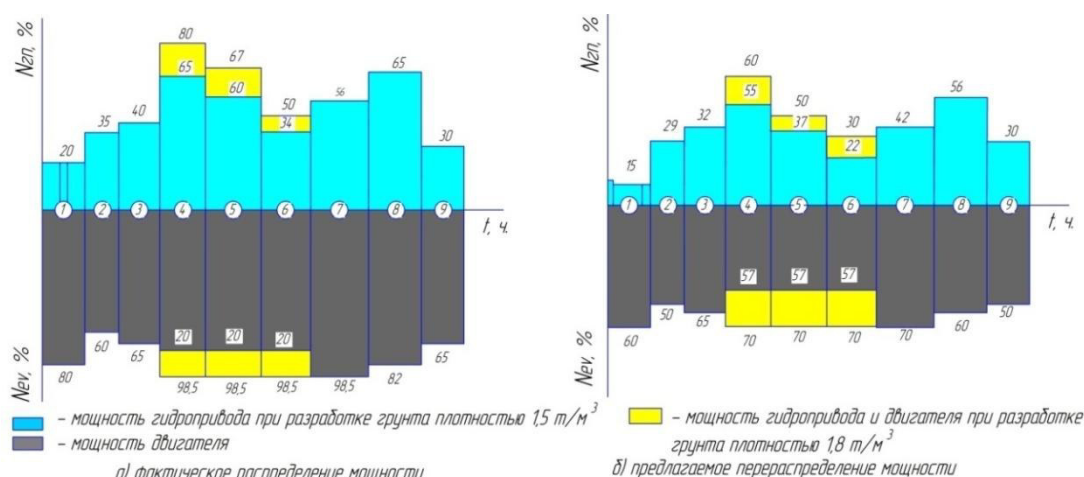


Рис. 4. Номограмма для определения зависимости изменении мощностных характеристик гидропривода $N_{г.п.}$ и силовой установки N_e от силы копания $R_{ковш}$ при разных положениях ковша $S_{п.гц.к.}$:

1 – кривая зависимости силы копания $R_{ковш.}$ от хода поршня $S_{п.гц.к.}$ (положение ковша); 2 – кривая зависимости мощности двигателя N_e от частоты вращения коленчатого вала n при передвижении экскаватора; 3 – кривая зависимости мощности двигателя N_e от частоты вращения коленчатого вала n при повороте платформы; 4 – кривая зависимости мощности двигателя N_e от частоты вращения коленчатого вала n при работе рабочим оборудованием; 5 – кривая зависимости давления гидропривода $P_{г.п.}$ от мощности двигателя $N_{г.п.}$; 6 – кривая зависимости мощности гидропривода $N_{г.п.}$ от силы копания $R_{ковш}$

Из номограммы видно, что максимальные значения мощности гидропривода $N_{г.п.} = 35 - 42$ кВт и двигателя $N_e = 102 - 105$ кВт достигаются при эксплуатации рабочего оборудования экскаватора (кривая 4). Номинальная мощность обеспечивает устойчивый режим работы оборудования при давлении гидропривода $P_{г.п.} = 17,5$ МПа и оборотах коленчатого вала $n = 1680$ об/мин. Пик нагрузок наблюдается при выходе штока гидроцилиндра ковша в пределах $S_{п.гц.к.} = 900 - 1350$ мм (кривая 1), что характеризует положение ковша в момент внедрения в грунт. После внедрения следуют операции «отрыв» и «выемка» грунта, которые сопровождаются значительным снижением мощности двигателя до $N_e = 65$ кВт и гидропривода $N_{г.п.} = 21$ кВт соответственно. При этом наблюдается

увеличение хода поршня $S_{п.гц.к.} = 1700$ мм (кривая 1) и снижение силы копания до 95 кН, что соответствует положению ковша, наполненного грунтом. Из номограммы (кривые 4, 5 и 6) видно, что энергоёмкость процесса высока только при внедрении ковша в грунт. Вторая и третья части операции (поворот и выемка) требуют меньших затрат энергии, однако силовая установка и гидропривод работают практически на тех же высоконагруженных режимах (рис. 3). Таким образом, перераспределение мощности силовой установки и гидропривода в соответствии с энергоёмкостью операций экскавации позволит повысить эффективность работы экскаватора. Для обеспечения адекватной оценки принципа распределения мощности гидропривода и силовой установки в зависимости от рабочих операций построена гистограмма распределения мощности (рис. 5).



Последовательность операций:

- 1 – Разгон, поворот платформы с рабочим оборудованием к забою и торможение;
- 2 – Опускание рабочего оборудования в забой; 3 – Поворот ковша к грунту; 4 – Внедрение зубьев и режущей кромки ковша в грунт;
- 5 – Резание грунта и наполнение ковша; 6 – Выемка загруженного ковша из забоя; 7 – Подъем оборудования с загруженным ковшом;
- 8 – Разгон поворот и торможение платформы, перемещение оборудования; 9 – Выгрузка ковша.

Рис. 5. Распределение мощности гидропривода и силовой установки

Исследования показали, что величина энергоемкости разработки грунтов землеройными машинами зависит не только от физико-механических свойств грунта, но и от конструктивных особенностей, схем включения гидроэлементов, мощностного баланса, а также изменения начальных параметров гидропривода в процессе эксплуатации.

Заключение

1. Обоснованы оптимальные соотношения между параметрами гидропривода и силовой установки экскаватора при выполнении технологических операций, позволяющие снизить энергоемкость рабочего процесса экскаватора. Установлены функциональные зависимости мощностных, силовых и эксплуатационных характеристик при разработке грунта, обеспечивающие получение новых результатов оценки и обоснования эффективности протекания технологического процесса работы одноковшового экскаватора.

2. Использование 50-60 % полезной мощности гидропривода в технологическом процессе свидетельствует о значительном резерве повышения потенциала экскаватора. Полезная мощность (энергия) обосновывает выбор рациональных режимов работы экскаватора, в том числе с учетом производительности, соответствующей энергетическим затратам на единицу объема разрабатываемого грунта.

3. Применительно к проблематике исследований раскрыты противоречия и несоответствия технологических параметров экскаватора с энергоэффективностью функционирования его систем.

Библиографический список

1. Кузнецова, В.Н. Развитие научных основ взаимодействия контактной поверхности рабочих органов землеройных машин с мерзлыми грунтами: дис.... д-ра техн. наук / В.Н. Кузнецова. – Омск: СибАДИ, 2009. – 259 с.
2. Савинкин, В.В. Развитие теории энергоэффективности одноковшового экскаватора: дис.... д-ра техн. наук / В.В. Савинкин. – Омск: СибАДИ, 2016. – 390 с.
3. Lee S.U. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface / S.U. Lee, P.H. Chang // Control Engineering Practice. – 2002. – Т. 10. – № 7. – pp. 697–711.
4. Кузнецова, В.Н. Обоснование критериев оценки эффективности экскаватора KOMATSU PC300 / В.Н. Кузнецова, В.В. Савинкин // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 3. – С. 9-12.
5. Кузнецова, В.Н. Исследование энергоемкости экскавационного цикла землеройной машины / В.Н. Кузнецова, В.В. Савинкин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – № 8 (668). – С. 60–68.
6. Seward D. Safety analysis of autonomous excavator functionality. / D. Seward, C. Pace, R. Morrey, I. Sommerville // Reliability Engineering & System Safety. – 2000. – Т. 70. – № 1. – С. 29–39.

**DISTRIBUTIONS OF POWER OF THE POWER
PLANT OF THE HYDRAULIC ACTUATOR
IN TECHNOLOGICAL PROCESS OF DIGGING
ODNOKOVSHOVY EXCAVATOR**

B.H. Kuznetsova, V.V. Savinkin

Abstract. Technological capabilities such digger is the excavator, depend on the power of the power plant, the type of work equipment, bucket capacity and drive systems. Performance indicators are excavator productivity, efficiency hydraulic drive expended power per unit volume of soil being developed, cost, minimal cycle times and state of the hydraulic drive. The article presents the results of the hydraulic drive of the internal energy research, which has been interpreted through an understanding of the power distribution principle of the hydraulic drive and the power plant. Established the most energy-intensive operation, causing overvoltage elements of the power plant and the hydraulic drive. Proposed the scientific concept of energy efficiency increase shovel capacity through redistribution allowed to expand the knowledge base in the field of efficiency of operation of earthmoving machinery.

Keywords: shovel, energy efficiency, power, hydraulic, power consumption.

References

1. Kuznetsova V.N. *Razvitie nauchnykh osnov vzaimodejstviya kontaktnoj poverhnosti rabochih organov zemlerojnyh mashin s merzlymi gruntami dis d-ra tehn. nauk* [Development of scientific bases of interaction of the contact surface of the working bodies of earth-moving machines with the frozen soil: dis Dr. tehn. sciences]. Omsk, 2009. 259 p.
2. Savinkin V.V. *Razvitie teorii jenergojeffektivnosti odnokovshovogo jekskavatora diss d-ra tehn. nauk* [Development of energy efficiency theory shovel Dis Dr. tehn. sciences]. Omsk, 2016. 390 p.

3. Lee S.U. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface / S.U. Lee, P.H. Chang // *Control Engineering Practice*. – 2002. – T. 10. – № 7. – pp. 697–711.

4. Kuznetsova V.N., Savinkin V.V. *Obosnovanie kriteriev ocenki jeffektivnosti jekskavatora KOMATSU PC300* [Justification criteria for evaluating the effectiveness of the excavator KOMATSU PC300]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2014, no 3. pp. 9-12.

5. Kuznetsova V.N., Savinkin V.V. *Issledovanie jenergoemkosti jekskavacionnogo cikla zemlerojnoj mashiny* [Research of power consumption of an excavation cycle of the digging car]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo*, 2014, no 8 (668). pp. 60–68.

6. Seward D. Safety analysis of autonomous excavator functionality. / D. Seward, C. Pace, R. Morrey, I. Sommerville // *Reliability Engineering & System Safety*. –2000. – T. 70. – № 1. – C. 29–39.

Савинкин Виталий Владимирович (Казахстан, г. Петропавловск) – кандидат технических наук, доцент Северо-Казахстанского государственного университета им. М. Козыбаева (150000, Казахстан, Петропавловск, ул. Пушкина, 86).

Кузнецова Виктория Николаевна (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, ул. Мира, 5, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Savinkin Vitaliy Vladimirovich (Kazakhstan, Petropavlovsk) – candidate of technical sciences, of The North Kazakhstan state university of M. Kozybayev (150000, Kazakhstan, Petropavlovsk, Pushkin St., 86).

Kuznetsova Viktoria Nikolaevna (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor of the Siberian State Automobile and Highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave. 5, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).