

УДК 625.08:620.169.1

А. Н. МАКСИМЕНКО¹, *В. В. КУТУЗОВ¹*, *Д. Ю. МАКАЦАРИЯ²*, *Е. В. ЗАРОВЧАТСКАЯ¹***ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭТАПА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
МАШИНЫ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ
В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**¹ *Белорусско-Российский университет,*² *Могилевский институт МВД Республики Беларусь**(Поступила в редакцию 22.05.2013)*

Введение. Перспективы социально-экономического развития Республики Беларусь во многом зависят от стратегии развития ведущих отраслей промышленности. При проектировании и изготовлении новой машины важно учитывать затраты на поддержание и восстановление ее работоспособности при использовании в соответствии с функциональным назначением. Затраты на поддержание и восстановление работоспособности машин за этап эксплуатации их жизненного цикла превышают в 5–10 раз по сравнению с изготовлением новых машин, а прогноз развития на XXI в. показывает, что в сфере эксплуатации и ремонта будет занято 80–90% всех трудовых ресурсов [1]. При этом затраты на обеспечение работоспособности можно существенно сократить повышением надежности машин с организацией фирменного обслуживания. Обеспечить высокий уровень работоспособности машин возможно только в результате комплексных взаимосвязанных мероприятий при проектировании, производстве и эксплуатации. Фирма-изготовитель должна быть экономически заинтересована в снижении суммарных затрат на обеспечение работоспособности выпускаемых машин.

В практике США, Англии, Японии и других наиболее развитых стран принята номенклатура показателей строительных машин, которая характеризует эффективность их использования у потребителя (коэффициент, учитывающий простои по обеспечению их работоспособности; амортизационный срок в часах работы; суммарная стоимость ремонта) [2]. В Республике Беларусь основу эффективности создания или модернизации машины составляет стоимость изготовления с фирменным контролем и обеспечением ее работоспособности только в гарантийный период. В данной статье предлагается методика оценки эффективности этапа эксплуатации жизненного цикла машины с учетом изменений технико-экономических показателей в процессе ее использования с применением положительных тенденций отечественного и зарубежного опыта.

Установившаяся практика обеспечения работоспособности машин в Республике Беларусь. В Республике Беларусь ведущими предприятиями машиностроения являются МАЗ, МТЗ, БелАЗ и Амкорд. Основные требования при создании новой машины (высокая производительность, надежность, простота управления и обслуживания, ремонтпригодность, удобство транспортировки, высокие эстетические качества) научно обоснованы [3] и не противоречат установившейся практике ведущих зарубежных фирм.

Однако в основу обеспечения работоспособности ведущие зарубежные производители машин закладывают фирменное обслуживание с полной ответственностью изготовителя за их техническое состояние за этап эксплуатации жизненного цикла.

Элементы положительного зарубежного опыта по фирменному обслуживанию внедряются в Республике Беларусь посредством увеличения продолжительности гарантийного периода до 2 лет [4]. Только тесная прямая и обратная связь между производителями и потребителями техники позволит обеспечить необходимое качество изготовления и работоспособность на этапе

эксплуатации жизненного цикла, а также повысить эффективность использования и конкурентоспособность конкретной машины. К сожалению, все ведущие предприятия машиностроения в Республике Беларусь обеспечивают работоспособность выпускаемой техники только в гарантийный период, что является существенным недостатком.

Анализ восстановления работоспособности погрузчиков Амкодор-332 и Амкодор-342 в гарантийный период эксплуатации показал, что средняя продолжительность ремонта составила 1,2 сут и не превышала 2 сут, это время входит в число показателей устранения неисправностей. После гарантийного периода единая система обеспечения работоспособности машины отсутствует, и уровень технической эксплуатации определяется технической базой и кадрами предприятия по использованию техники. Продолжительность восстановления работоспособности подконтрольных погрузчиков после гарантийного периода увеличивается в 3–5 раз и исчисляется в отдельных случаях месяцами при отказе сложных сборочных единиц.

Основной причиной значительных простоев дорогостоящей техники после гарантийного периода эксплуатации является отсутствие централизованного контроля за выполнением правил эксплуатации машин, а также предприятий по ремонту их сборочных единиц. В настоящее время в Республике Беларусь нет ни одного завода по капитальному ремонту сложных машин и их сборочных единиц и агрегатов, за исключением двигателей. Восстановление работоспособности сборочных единиц на предприятиях, эксплуатирующих машины, не обеспечивает планируемый ресурс из-за отсутствия современного оборудования и квалифицированных кадров. Такое состояние с восстановлением работоспособности машин обеспечивает только 50% ресурса, задаваемого изготовителем, а простои в капитальных ремонтах превышают нормативные показатели в 5,5 раза, что приводит к снижению рабочего времени в год их проведения до 40% от среднего значения. Установившаяся практика обеспечения работоспособности сложной техники формирует мнение специалистов о нецелесообразности капитальных ремонтов. Объективно необходимость проведения капитального ремонта определяет анализ технических и экономических факторов.

Показано, что затраты на капитальный ремонт составляют по машинам 40–60% и по агрегатам 25–65% от стоимости вновь изготовленных изделий при снижении затрат на материалы и комплектующие в 2–3 раза [2]. Последнее условие особенно важно для нашей страны при нарастающем дефиците металлов.

С увеличением стоимости техники целесообразность капитального ремонта возрастает. Его необходимо налаживать на основе межведомственных региональных центров по капитальному ремонту основных сборочных единиц и агрегатов сложной техники. Это позволяет восстанавливать работоспособность с ресурсом, близким к новым изделиям, и внедрять агрегатный метод ремонта на предприятиях по их эксплуатации. Для техники, производимой в Республике Беларусь, целесообразно наладить фирменное обслуживание, что позволит повысить качество и ремонтпригодность машины за счет устойчивой обратной связи в процессе ее проектирования, производства и эксплуатации.

Второй существенный недостаток при производстве сложной техники состоит в том, что выходные параметры, закладываемые в конструкцию машины, рассматриваются без их динамики в процессе эксплуатации. Основной выходной параметр в соответствии с функциональным назначением машины (производительность) принимается постоянным за межремонтный период.

Исследования по влиянию наработки с начала эксплуатации на производительность строительных и дорожных машин (СДМ) показали снижение эксплуатационной производительности в 2–3 раза за межремонтный цикл [5]. Оно сопровождается увеличением затрат на поддержание и восстановление работоспособности машины, что приводит в совокупности к большой интенсивности роста стоимости единицы механизированных работ.

С увеличением наработки с начала эксплуатации снижается годовое количество рабочего времени свыше 50% [5] и растут эксплуатационные затраты до 50% [6]. Такие изменения технико-экономических показателей необходимо учитывать не только при планировании и организации эксплуатации машин, но и при оценке эффективности технических решений на этапах проектирования и производства.

Снижение затрат с обеспечением высоких показателей надежности – основная задача, которая ставится в настоящее время перед производителем. Современный уровень развития науки и техники позволяет достичь любых показателей надежности. Однако повышение надежности связано с увеличением стоимости изготовления машины. Поэтому при ее производстве необходимо рассматривать повышение надежности на основании снижения удельных суммарных затрат ($Z_{уд}$) и максимальной прибыли на единицу произведенной продукции ($\Pi_{уд}$):

$$Z_{уд} = \frac{(C_{и} + C_{э})}{H_{ОПТ} \Pi_{Т}} \rightarrow \min , \quad (1)$$

$$\Pi_{уд} = \frac{C_{н} - (C_{и} + C_{э})}{H_{ОПТ} \Pi_{Т}} \rightarrow \max , \quad (2)$$

где $C_{н}$ – стоимость работы, выполняемой машиной в соответствии с ее целевым назначением за наработку $H_{ОПТ}$; $C_{и}$ – стоимость новой машины, включая затраты на проектирование, изготовление, испытание, отладку и доставку к месту работы; $C_{э}$ – стоимость эксплуатации машины с учетом обеспечения ее работоспособности за наработку $H_{ОПТ}$; $\Pi_{Т}$ – техническая производительность машины; $H_{ОПТ}$ – наработка машины, соответствующая максимальной прибыли, определяемая по методике [14].

Как правило, целесообразно повышать затраты на изготовление и снижать их на обеспечение работоспособности машины. Однако при увеличении затрат на изготовление новых машин требуется экономическое обоснование по их рациональному распределению на повышение выходных параметров и надежности.

Увеличение затрат на повышение выходных параметров машины способствует росту $\Delta C_{н}$ и $\Delta C_{э}$ (с увеличением интенсивности работы машины растут эксплуатационные расходы $C_{э}$).

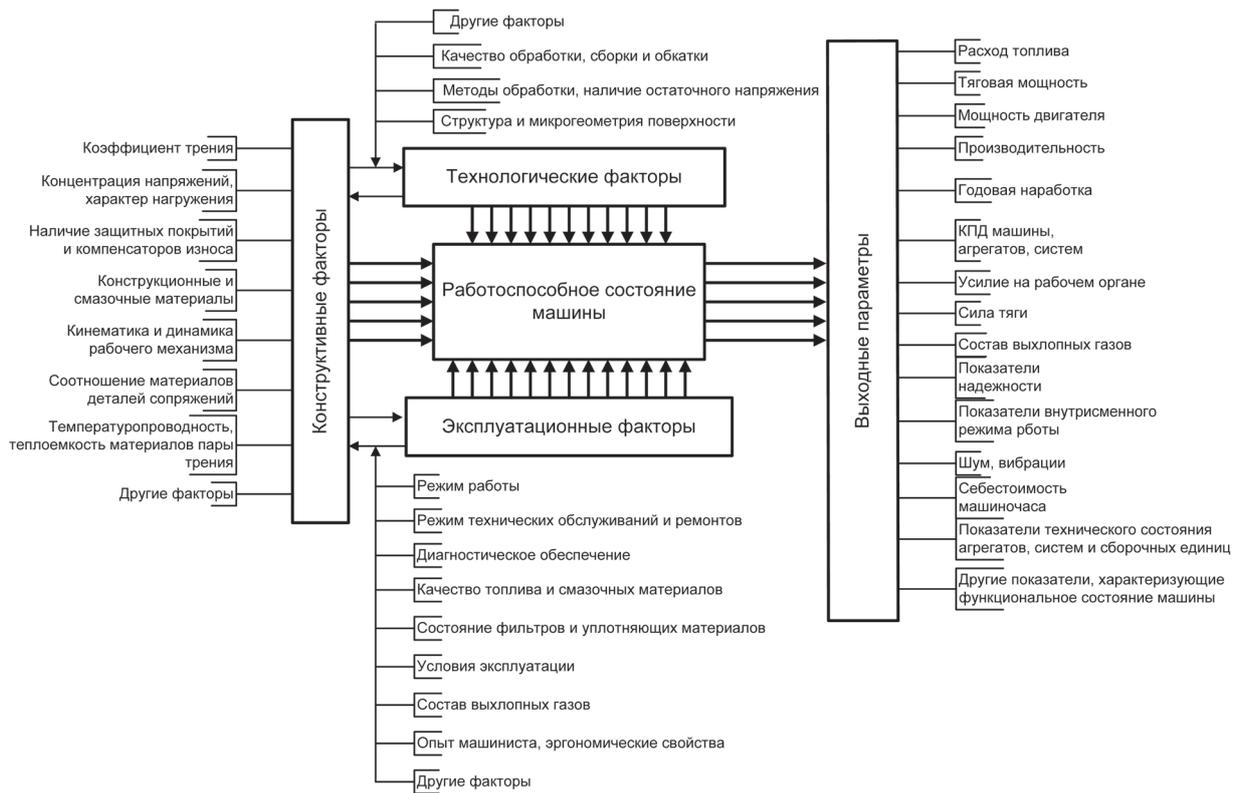
Если дополнительные средства при создании новой машины будут направлены только на повышение надежности, то величина $\Delta C_{н}$ возрастает, а значение $\Delta C_{э}$ соответственно снижается, при неизменных выходных параметрах получение высокой прибыли будет ограничено. Здесь важно распределить дополнительные затраты на повышение выходных параметров и надежности, чтобы величина $\Pi_{уд}$ была максимальной к наработке соответствующей максимальной прибыли.

В сложившихся условиях решения задач по обеспечению работоспособности машин должны быть переориентированы на использование внутренних резервов с учетом снижения интенсивности роста эксплуатационных затрат и интенсивности снижения производительности на этапе эксплуатации их жизненного цикла. Потенциальные возможности повышения эффективности использования машин в строительной отрасли составляют до 80% за счет совершенствования режимов их технического обслуживания, ремонта и диагностики [7] при использовании накопленного зарубежного и отечественного опыта, в том числе и на предприятиях строительной отрасли нашей страны.

Важнейшие факторы, влияющие на работоспособность машины. Численные значения параметров, характеризующих способность машины выполнять заданные функции, устанавливаются в техническом задании при проектировании; обеспечиваются качеством изготовления, сборки и обкатки при производстве; реализуются в процессе эксплуатации с повышением или уменьшением области работоспособного состояния в зависимости от режимов технических обслуживаний и ремонтов, диагностического обеспечения, применяемых топлив и смазочных материалов, условий работы и т. д.

Интенсивность изменений выходных параметров, характеризующих работоспособность машины, зависит от множества факторов, которые можно объединить в три группы (рисунок). Обеспечение высокого уровня работоспособности машины возможно только в результате комплексных взаимосвязанных мероприятий при ее проектировании, производстве и эксплуатации.

При создании новой машины критериями ее работоспособности являются прочность, износостойкость, жесткость, теплостойкость, вибрационная устойчивость [3]. Однако на этапе эксплуатации основной критерий по обеспечению работоспособности машины – износостойкость,



Основные факторы, влияющие на работоспособность машины

так как потеря работоспособности машин более 80% происходит вследствие износа [2]. Процесс изнашивания зависит от множества факторов и величина износа носит случайный характер. Для определения потребности в запасных частях, прогнозирования ресурса, обоснования режимов технических обслуживаний и ремонтов устанавливаются вид закона распределения отказов вследствие износа, его характеристики и границы отклонения. В этом случае результаты расчета основаны на средней величине скорости изнашивания.

На этапе эксплуатации машин одни факторы, характеризующие условия эксплуатации (температура, запыленность и влажность окружающей среды и др.), изменяют скорость изнашивания и влияют на конструктивные и технологические решения для снижения их влияния на выходные параметры машины. Другими факторами (режимы нагружения, обслуживания и ремонта; повышение качества применяемых топлив, масел и технических жидкостей; токсичность выхлопных газов; очистка используемых масел и др.) можно управлять в процессе поддержания и восстановления работоспособности машины. Износ сопряжений непосредственно влияет на выходные параметры машины, снижая ее работоспособность. Для управления изменением выходных параметров, характеризующих способность выполнения заданных функций, необходимо установить их зависимости от износа сопряжений, лимитирующего наработку работоспособного состояния.

Анализ параметров надежности гидрофицированных машин показывает, что самая низкая вероятность безотказной работы наблюдается у гидропривода [8] (более 50% отказов от общего количества). Исследования авторов [9] подтверждают, что вероятность безотказной работы гидропривода в целом погрузчика Амкордор-332 к наработке 1000 моточасов оказалось самой низкой и составила 0,4.

Важнейшими факторами, лимитирующими наработку до отказа гидронасосов, гидродвигателей и аппаратуры управления, являются количество механических примесей в рабочей жидкости и их размеры (снижение с 20 до 5 мкм увеличивает ресурс насосов в 10 раз). Заложив при проектировании тонкость очистки рабочей жидкости менее 5 мкм и максимальную наработку ее замены с учетом рекомендуемой технологии, можно обеспечить работоспособность основных

элементов гидропривода на протяжении ресурса машины (фирма JSB обеспечивает тонкость очистки рабочей жидкости 1,5 мкм с наработкой ее замены 6000 моточасов, что позволяет стабилизировать техническую производительность на этапе эксплуатации). Заложенные параметры работоспособности на этапе проектирования и изготовления машины обеспечивают эксплуатацию в соответствии с ее функциональным назначением. Продолжительность работоспособности машины определяется не только совершенством конструкции и качеством изготовления, но и динамикой основных выходных параметров (производительности, себестоимости машино-часа, количества рабочего времени, КПД, комплексного показателя надежности и др.). С увеличением наработки машины с начала эксплуатации эти параметры существенно изменяются [5, 10, 12] и достигают предельных значений, при которых дальнейшее ее использование нецелесообразно.

Рациональная эксплуатация может быть продлена при поддержании работоспособности машины в соответствии с рекомендациями производителя и организацией ее восстановления в соответствии с предложенным ранее методом ремонта и диагностики [9, 11]. Часовая эксплуатационная производительность машины зависит от внутрисменного режима работы, количество рабочего времени – от продолжительности технических обслуживаний и ремонтов, а себестоимость машино-часа – от принятой системы поддержания и восстановления работоспособности и уровня ее реализации.

Динамику выходных параметров машины можно определить диагностированием по параметрам, характеризующим изменение ее работоспособного состояния. Дополнительные затраты на диагностику и ремонт позволяют увеличить значения выходных параметров (КПД гидропривода и др.), что приведет к существенному снижению стоимости единицы продукции, повышению производительности, выручки и прибыли. Оценку технического состояния машины в целом можно производить по изменению мощности, расхода топлива, КПД, усилия на рабочем органе, состава выхлопных газов и др.

При предельном значении одного из выходных параметров машина теряет работоспособное состояние и требуется техническое воздействие для восстановления численных величин выходных параметров. Одним интегральным выходным параметром машины является производительность, которая зависит от мощности, КПД, усилия на рабочем органе, внутрисменного режима работы, годовой наработки и др. Другим интегральным выходным параметром машины является себестоимость машино-часа, которая включает затраты, связанные с ее использованием в соответствии с функциональным назначением и затраты на поддержание и восстановление ее работоспособности. Исследования по эксплуатационным затратам при использовании машины показали, что на топливо, смазочные материалы, технические жидкости и на обеспечение работоспособности расходуется более 70%. При этом данные составляющие себестоимость машино-часа увеличиваются с повышением наработки машины с начала эксплуатации.

На этапе эксплуатации жизненного цикла машины оценку параметров, характеризующих ее работоспособное состояние, необходимо обеспечивать не по усредненным значениям с указанием доверительной вероятности, а по фактическим величинам, определяемым по результатам диагностирования и (или) индивидуального учета. Последний ведется на предприятиях дорожной отрасли с установкой на каждую машину приборов, определяющих расход топлива, наработку, полезное время работы, простой и другие показатели.

Анализ динамики выходных параметров с экономической оценкой эффективности использования машины позволяет определить изменения области ее работоспособности. Снижение интенсивности изменений контролируемых параметров и их качественное улучшение посредством технического воздействия позволят расширить область работоспособного состояния машины и повысить эффективность ее использования.

Оценка эффективности использования машины с учетом динамики выходных параметров в процессе ее эксплуатации. Повышение качества должно проводиться на основе общей заинтересованности изготовителя, потребителя и общества в целом.

Основная задача изготовителя – выпуск изделий необходимого качества с минимальными затратами, обеспечивающими их высокую конкурентоспособность.

Любое изделие создается и изготавливается для выполнения полезной работы при его использовании в соответствии с функциональным назначением. При этом задача потребителя – максимальное использование потенциальных возможностей конструкции изделия при выполнении полезной работы с минимальными затратами на сохранение и восстановление его работоспособности.

Получение максимального эффекта при создании и эксплуатации объекта определяется минимальными суммарными затратами на изготовление и эксплуатацию, а также объемом полезной работы, выполненной им за жизненный цикл изделия.

В общем случае изменение суммарного экономического эффекта \mathcal{E}_Φ можно представить следующим выражением:

$$\mathcal{E}_\Phi = C_H - (C_{II} + C_{\mathcal{E}}). \quad (3)$$

В процессе наработки H изделия стоимость выполняемой полезной работы C_H при значениях технической производительности P_T для новой машины и стоимости единицы продукции C_T определяется таким образом:

$$C_H = P_T H K_C K_{II}^X K_{\mathcal{E}} C_T, \quad (4)$$

где C_T – стоимость единицы выполненной работы, которая закладывается в смету и определяется в соответствии с нормативным документом [13], руб; H – наработка с начала эксплуатации, моточас; P_T – техническая производительность машины, $m^3/ч$, $m^2/ч$, $t/ч$; $K_{\mathcal{E}}$ – коэффициент эргономических свойств машины; K_C – коэффициент, учитывающий снижение технической производительности; K_{II}^X – коэффициент, учитывающий работу ДВС на холостых оборотах.

В процессе наработки с начала эксплуатации величина P_T значительно изменяется (для гидрофицированных СДМ она может превышать 50 % значения перед капитальным ремонтом) и ее можно представить как функцию от H :

$$P_T = F_1(H). \quad (5)$$

В этом случае стоимость выполненной работы изделием за наработку H равна

$$C_H = \int_0^H C_T F_1(H) dH. \quad (6)$$

При существенном уменьшении значения C_H , в процессе эксплуатации изделия стоимость работ по сохранению и восстановлению его работоспособности увеличивается, особенно при наработке, превышающей 0,5 среднего ресурса (для рассматриваемых гидрофицированных строительных машин с достаточной точностью ее можно выразить трехчленом второго порядка), и в общем виде можно записать

$$C_{\mathcal{E}} = \int_0^H F_2(H) dH. \quad (7)$$

Использование информационных технологий при эксплуатации машины с учетом характера изменения величин C_H и $C_{\mathcal{E}}$ позволит эксплуатирующей организации оперативно по каждому изделию определить целесообразность дальнейшей эксплуатации или капитального ремонта, а также суммарный экономический эффект при любой наработке с начала эксплуатации.

При индивидуальном подходе к оценке эффективности использования СДМ за рассматриваемый период производится учет информации по объему полезно выполняемой работы, динамике выходных параметров машины, простоев и трудоемкости при поддержании и восстановлении работоспособности, расхода топливосмазочных материалов и запчастей.

Все данные в настоящее время фиксируются в карточках по учету эксплуатации СДМ в соответствии с нормативной документацией.

В каждом i -м интервале по исходным данным определяются величины $C_{\mathcal{E}Hi}$, C_{Hi} и \mathcal{E}_{Hi} , которые за период времени с начала эксплуатации оцениваются суммой значений по всем интервалам:

$$C_H = \sum_{i=1}^n C_{Hi} = \sum_{i=1}^n \Pi_{Ti} K_{Ci} K_{Pi}^X K_{\Theta i} H_i, \quad (8)$$

$$C_{\Theta H} = \sum_{i=1}^n C_{\Theta Hi} = \sum_{i=1}^n C_{MЧ}^{PP} H_i K_{Pi}^X, \quad (9)$$

$$\Theta_H = \sum_{i=1}^n \Theta_{Hi} = \sum_{i=1}^n \Pi_{Ti} K_{Ci} K_{Pi}^X K_{\Theta i} H_i (C_{Ti} - C_{\Theta Hi}^{PP}) - C_{\Theta H}, \quad (10)$$

где n – число рассматриваемых интервалов за количество рабочего времени.

С увеличением наработки с начала эксплуатации происходит накопление численных значений расчетных технико-экономических показателей, позволяющих определить наработку окупаемости, предельную наработку роста суммарного экономического эффекта и прибыльной эксплуатации машины, а также выработку рекомендаций о прекращении ее использования.

Выводы

1. Достижение максимального народнохозяйственного эффекта и обеспечение создания конкурентоспособных машин в Республике Беларусь возможно только в результате комплексных взаимоувязанных мероприятий на этапах жизненного цикла машины с учетом изменений технико-экономических показателей при ее использовании

2. Обеспечение работоспособности машины и экономии ресурсов страны на этапе эксплуатации ее жизненного цикла целесообразно планировать на основе минимальных удельных суммарных затрат и максимальной прибыли на единицу производимой продукции.

3. Изменения выходных параметров машины при использовании ее в соответствии с функциональным назначением важно учитывать на всех этапах жизненного цикла.

4. Планирование и организацию восстановления работоспособности машины необходимо определять с учетом изменений выходных параметров по предложенному методу, позволяющему получить максимальную прибыль и суммарную наработку за этап эксплуатации ее жизненного цикла.

Литература

1. *Проников А. С.* Параметрическая надежность машин. М., 2002.
2. *Зорин В. А.* Основы работоспособности технических систем: Учебник для вузов. М., 2005.
3. *Скойбеда А. Т., Кузьмин А. В., Майданчик Н. Н.* Детали машин и основы конструирования: Учебник / Под общ. ред. А. Т. Скойбеда. 2-е изд., перераб. Мн., 2006.
4. Положение о гарантийном сроке эксплуатации сложной техники и оборудования. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 27.06.2008 № 952.
5. *Максименко А. Н., Кутузов В. В., Кутузова Е. В.* и др. // Строительная наука и техника. 2009. № 6 (27). С. 73–76.
6. *Максименко А. Н., Макарация Д. Ю., Кутузов В. В.* и др. // Грузовик &. 2007. № 2. С. 32–36.
7. *Максименко А. Н.* Эксплуатация строительных и дорожных машин: Учеб. пособие. СПб., 2006.
8. *Рубайлов А. В., Керимов Ф. Ю., Дворковой В. Я.* и др. Эксплуатация подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин: Учеб. / Под ред. Е. С. Локшина. М., 2007.
9. *Максименко А. Н., Кутузов В. В., Федосов А. Н., Кляусов В. В.* // Строительная наука и техника. 2009. № 3(24). С. 68–73.
10. *Максименко А. Н., Макарация Д. Ю., Тимофеев Г. С.* и др. // Строительная наука и техника. 2009. № 2(23). С. 86–92.
11. Рекомендации по совершенствованию технического обслуживания и ремонта дорожно-строительных машин с учетом целесообразности их эксплуатации на любом этапе с начала использования: ДМД 09191.7.008–2009. Введ. 01.03.09. Мн., 2009.
12. *Максименко А. Н., Макарация Д. Ю., Кутузов В. В.* // Механизация строительства. 2009. № 3. С. 14–20.
13. Методические рекомендации о порядке разработки индивидуальных ресурсно-сметных норм Приказ Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь 18.06.2010 № 217
14. *Максименко А. Н.* Оценка эффективности использования строительных и дорожных машин: Монография. Могилев, 2012.

A. N. MAKSIMENKO, V. V. KUTUZOV, D. Y. MAKATSARYIA, E. V. ZARAUCHATSKAYA

**EVALUATION OF EFFECTIVENESS OF STAGE OPERATION OF MACHINE LIFE CYCLE
WITH CONSIDERATION OF ITS OUTPUT PARAMETERS DYNAMICS DURING ITS OPERATION**

Summary

Such issues as efficiency estimation of life cycle phase of a machine subjected to the changes of technical and economic rates during its operation are being analyzed. Productivity, machine hour cost, quantity of operating time, coefficient of efficiency, operating efficiency, coefficient of intra-shift use and other technical and economic parameters are changing during operation of a machine. There's been introduced a strategy for maintenance service and repairs that results in maximizing profits during the life cycle of a machine subject to the changes of technical and economic parameters.