

Научная статья
УДК 625.76.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560>
EDN: UCHWDO



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ОДНОКОВШОВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Р.Ф. Салихов ✉, **В.Б. Пермяков**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
salikhorinat@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие автомобильно-дорожного строительства является приоритетным направлением в российской экономике. Своевременная сдача в срок объектов строительства повышает требования к планированию проведения механизированных работ. Процесс эксплуатации транспортно-технологических машин в течение продолжительного времени приводит к снижению их потенциальных возможностей, в том числе и эксплуатационной производительности. Целью предлагаемой статьи является совершенствование метода расчета производительности одноковшового гидравлического экскаватора (ЭО) с учетом наработки.

Методы и материалы. Метод расчета производительности учитывает динамику рабочего давления в гидравлической системе рабочего оборудования (ГРО), частоты вращения коленчатого вала (ЧВКВ) от наработки, для описания которых использовались регрессионные зависимости. Также были получены параметры закона распределения случайной величины рабочего давления в ГРО и скорости его падения для операции «разработка и набор грунта».

Результаты. Обработка результатов производственных экспериментов позволила установить зависимости изменения рабочего давления в гидравлической системе в процессе разработки и набора грунта, а также для всех технологических операций рабочего цикла, частоты вращения коленчатого вала двигателя ЭО от наработки. Исследовано влияние рабочего давления в ГРО, ЧВКВ двигателя экскаватора на подачу, гидравлическую мощность, продолжительность выполнения технологических операций. Проведен расчет эксплуатационной производительности ЭО с учетом динамики параметров, отражающих ее изменение с течением наработки.

Обсуждение и заключение. Установлено, что с увеличением наработки рабочее давление в ГРО снижается в среднем на 12,7–13,0%, снижение среднего значения рабочей ЧВКВ составляет 4%. Расчетная величина падения средней часовой эксплуатационной производительности ЭО с учетом ухудшения технического состояния составляет 65% на интервале наработки от 0 до 10 000 мото-часов для модели японского ЭО ZX 330.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: производительность экскаватора, наработка, объемный КПД, гидравлическая мощность, рабочее давление в гидросистеме, частота вращения коленчатого вала

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 05.05.2024; одобрена после рецензирования 22.07.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Салихов Р.Ф., Пермяков В.Б. Исследование влияния динамики технических параметров на эксплуатационную производительность гидравлических одноковшовых экскаваторов // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 540-560. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560>

© Салихов Р.Ф., Пермяков В.Б., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560>

EDN: UCHWDO

STUDY OF THE TECHNICAL PARAMETERS DYNAMICS INFLUENCE ON OPERATIONAL PERFORMANCE OF HYDRAULIC SINGLE-BUCKET EXCAVATORS

Rinat F. Salikhov ✉, Vladislav B. Permiakov

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

✉ corresponding author

salikhorinat@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The development of automobile and road construction is a priority in the Russian economy. Timely putting construction projects in commission increases the requirements for planning of execution mechanized works. The operation of transport and technological machines in construction processes for a long time leads to a decrease in their potential capabilities, including operational productivity. The purpose of the proposed article is to improve the method of calculating the performance of a single-bucket hydraulic excavator (EO), taking into account the operating time.

Methods and materials. The performance calculation method takes into account the dynamics of the working pressure in the hydraulic system of the working equipment (GRO), the speed of rotation of the crankshaft (PMVC) from the operating time, regression dependencies were used to describe them. The parameters of the law of distribution of the random value of the working pressure in the hydraulic drive and the rate of its fall for the 'development and recruitment of soil' operation were also obtained.

Results. Processing of the results of production experiments enables to establish the dependence of changes in the working pressure in the hydraulic system during development and gathering soil, as well as for all technological operations of the working cycle, the rotational frequency of the crankshaft of a single-bucket excavator engine on the operating time. The influence of the working pressure in the hydraulic drive, the rotational speed of the crankshaft of the excavator engine on the supply and hydraulic power, the duration of technological operations is studied. The calculation of the operational productivity of a single-bucket excavator is carried out taking into account the dynamics of parameters reflecting its change over operating time.

Discussion and conclusions. It has been established that with an increase in operating time, the operating pressure in the hydraulic drive decreases by an average of 12.7-13.0%, and the decrease in the average operating speed of the crankshaft is 4%. The estimated value of the drop in the average hourly operating performance of the EO, taking into account the deterioration of the technical condition, is 55% in the operating time range from 0 to 10,000 operating hours for the Japanese EO ZX 330 model.

KEYWORDS: excavator performance, operating time, volumetric efficiency, hydraulic power, operating pressure in the hydraulic system, crankshaft rotation frequency

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to the editorial board of the Russian Automobile and Highway Industry Journal and the reviewers of the article.

The article was submitted 05.05.2024; approved after reviewing 27.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Salikhov R.F., Permyakov V.B. Study of the technical parameters dynamics influence on operational performance of hydraulic single-bucket excavators. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 540-560. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560>

© Salikhov R.F., Permyakov V.B., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие автомобильно-дорожного строительства является приоритетным направлением в российской экономике. Строительство новых автомобильных дорог не обходится без применения дорожной техники. Своевременная сдача в срок объектов строительства повышает требования к планированию проведения механизированных работ. Строительство и ввод объектов в срок зависит от разных факторов: природно-климатических, организационных, экономических, технических [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

Процесс эксплуатации транспортно-технологических машин в строительных процессах в течение продолжительного времени приводит к снижению их потенциальных возможностей, в том числе и эксплуатационной производительности. Строительство объектов – сложный технологический процесс, требующий использования различных средств механизации, таких как одноковшовые экскаваторы, бульдозеры, рыхлители, трубоукладчики и др. При строительстве и ремонте автомобильных дорог основную долю занимают объемы по возведению земляного полотна. Одноковшовые экскаваторы (ЭО) благодаря своей универсальности и высокой производительности при разработке грунтов различных категорий получили наибольшее распространение в производстве земляных работ^{1, 2, 3}. Экскаваторы, как правило, являются ведущими машинами в комплексе с другими видами техники, например, грузовым автотранспортом, поэтому снижение производительности ЭО может значительно сказаться на технологических простоях остальных видов средств механизации. Это может привести к значительным издержкам производства, величине недополученной прибыли. Отсутствие учета снижения величины производительности различных видов строительной техники сказывается на качестве подбора состава комплектов машин. В силу влияния различных факторов величина снижения производительности будет отличаться среди машин комплекта, даже одного вида с течением времени.

В последнее время нашли широкое применение бортовые системы измерения производительности строительных машин, в связи с чем ряд работ направлен на фактическое измерение данного параметра, что позволяет оперативно отслеживать причины ее изменения в процессе эксплуатации [8, 9, 10].

Для повышения точности расчета величины снижения производительности в процессе эксплуатации ЭО необходимо использовать комплексные диагностические параметры, способные оценивать износ совокупности агрегатов. Анализ работ, изучавших изменение технических параметров, в частности, описывающих ухудшение состояния элементов гидропривода, показал отсутствие исследований изменения рабочего давления с течением наработки. Учет изменения объемного коэффициента полезного действия (КПД) элементов гидропривода предполагает измерение данного показателя при номинальном значении. Как показали нижеприведенные исследования, рабочее давление отличается от номинального, а значит, требует корректирования при расчете действительного значения падения объемного КПД.

Также объемный КПД гидравлической системы рабочего оборудования (ГРО) зависит от частоты вращения коленчатого вала (ЧВКВ). Измерение объемного КПД производится при номинальной величине ЧВКВ. Изучение динамики данного параметра позволит учитывать его влияние на подачу в ГРО, а следовательно, и на КПД элементов ГП в течение исследуемого интервала наработки.

Целью предлагаемой статьи является совершенствование метода расчета производительности одноковшового гидравлического экскаватора с учетом наработки. Для достижения поставленной цели необходимо оценить влияние динамики рабочего давления в ГРО, частоты вращения коленчатого вала на интенсивность изменения объемного КПД элементов гидропривода с течением наработки, выдать рекомендации по поддержанию рациональной величины вышеуказанных параметров.

¹ Доценко А.И., Карасев Г.Н., Кустарев Г.В., Шестопалов К.К. Машины для земляных работ: учебник для студентов вузов. М.: «Издательский дом «БАСТЕТ», 2012. 688 с.

² Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация): учеб. пособие / В.Б. Пермяков, В.И. Иванов, С.В. Мельник [и др.]; под ред. В.Б. Пермякова. М.: ИД «Бастет», 2014. 752 с.

³ Волков Д.П. Строительные машины: учеб. для вузов по спец. ПГС / Д.П. Волков, Н.И. Алешин, В.Я. Крикун, О.Е. Рынсков; под ред. Д.П. Волкова. М.: Высш. шк., 1988. 319 с.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

На этапе проектирования комплектов машин, особенно для долгосрочных проектов, важно учитывать предполагаемую величину падения выработки единичной техники. Это приведет к снижению издержек, связанных с организационными простоями, вызванными несоответствием производительности отдельных видов машин внутри комплекта заданному темпу, ущерба от срыва сроков строительства. В настоящее время существуют методы, направленные на учет падения выработки машин.

Исследование, проведенное проф. В.Г. Самойловичем, было посвящено учету простоев в зоне технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), которые возрастают с увеличением срока эксплуатации. В его работе приведена зависимость изменения коэффициента снижения эксплуатационной производительности для некоторых видов строительных машин от срока эксплуатации⁴.

Данный подход учитывает только влияние изменения продолжительности простоев ТО и Р, связанных с обеспечением работоспособности в зависимости от срока эксплуатации техники на годовую производительность.

Второй способ подразумевает изменение производительности от наработки путем учета увеличения продолжительности времени рабочего цикла, связанного с уменьшением скорости выполнения технологических операций из-за ухудшения технического состояния различных видов агрегатов. Например, снижение мощности двигателя внутреннего сгорания (ДВС), КПД гидропривода, затупление режущих элементов^{5, 6, 7, 8, 9} [1, 2, 3, 4, 5].

Способы, учитывающие влияние изменения параметров технического состояния на увеличение продолжительности рабочего цикла в процессе наработки, сосредоточены только на отдельных системах и узлах машины, что не позволяет комплексно оценить общее влияние на изменение продолжительности выполнения технологических операций. Необходим комплексный параметр, рассматривающий совокупное влияние ухудшения технического состояния систем машин на производительность. Также не учитывается продолжительность простоев в зоне ТО и Р.

Третий способ учитывает общие изменения производительности как с учетом простоев, так и снижением скорости выполнения технологических операций¹⁰. Автор предлагает коэффициенты ухудшения технико-экономических показателей за год эксплуатации техники в связи с ее старением: K_n – сокращение производительности из-за износа агрегатов и узлов, $K_n = 0,5 - 2,5\%$; K_ϕ – уменьшение годового фонда рабочего времени по причине отказов и ремонтов, $K_\phi = 2 - 4\%$. Недостатками третьего подхода являются опосредованный учет изменения производительности. Так как экскаватор работает в широком диапазоне нагрузок, то ежегодное изменение производительности может превышать 2–4%, потому что изменение производительности по техническим причинам может носить нелинейный характер, что также приведет к некорректному учету данного параметра.

На скорость разработки и наполнение ковша грунтом влияют его прочность, однородность, сопротивление одноосному сжатию, коэффициент трения грунта по стали, основные физико-механические характеристики

⁴ Российская энциклопедия самоходной техники. Основы эксплуатации и ремонта самоходных машин и механизмов: справ. и учеб. пособие для специалистов отрасли «Самоходные машины и механизмы». Т. 1 / В.А. Зорин, В.А. Синецын, К.К. Шестопапов, А.Н. Новиков, Ю.П. Бакатин, А.В. Рубайлов [и др.]; гл. науч. рук. работы В.А. Зорин; МАДИ. 1-е изд. М.: 2001. 407 с.

⁵ Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. М.: Машиностроение, 1979. 112 с.

⁶ Харазов А.М. Методы оптимизации в технической диагностике машин: научное издание / А.М. Харазов, С.Ф. Цвид. М.: Машиностроение, 1983. 132 с.

⁷ Техническая диагностика гидравлических приводов / Т.В. Алексеева, В.Д. Бабанская, Т.М. Башта [и др.]; под общей редакцией Т.М. Башты. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.

⁸ Гринчар Н.Г. Надежность гидроприводов путевых, строительных и грузоподъемных машин: учеб. пособие для вузов. М.: МИИТ, 2001. 112 с.

⁹ Кабашев Р.А., Кульгильдинов М.С. Исследование процесса копания гидравлическим экскаватором ЭО-3122 с изношенными зубьями // Проблемы совершенствования и моделирования дорожной техники и технологических процессов строительства автомобильных дорог и автотранспорта: тезисы докл. Алма-Ата, 1992. 183 с.

¹⁰ Луцкий С.Я. Корпоративное управление техническим перевооружением фирм: учеб. пособие / С.Я. Луцкий, А.Я. Ландсман; под. ред. А.Г. Поршнева. М.: Высш. шк., 2003. 319 с.

(плотность, относительная влажность, число ударов плотнера ДорНИИ, угол внутреннего трения, сцепление), площадь поперечного сечения, толщина стружки, угол резания, удельная сила липкости^{11, 12}. В данной статье особое внимание уделено изменению производительности от наработки путем учета увеличения продолжительности времени рабочего цикла, связанного с уменьшением скорости выполнения технологических операций. Уменьшение скорости выполнения технологических операций связано с ухудшением технического состояния различных видов агрегатов, деталей. Например, снижение мощности ДВС, КПД гидропривода (ГП) рабочего оборудования (РО), затупление режущих элементов [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Исследования, проведенные А.М. Харазовым, посвящены учету снижения объемного КПД элементов гидропривода, которые влияют на производительность гидрофицированных машин¹³.

В работах^{14, 15} степень влияния объемного КПД на производительность машины определяется удельным весом продолжительности полезной работы гидропривода в общем цикле (времени) работы машины. Проведенные исследования позволили определить предельное значение объемного КПД, оптимизировать периодичность замены элементов ГП. Исходя из предложенного метода, можно сделать вывод о том, что общее падение КПД одинаково влияет на продолжительность каждой технологической операции, а именно её увеличение от наработки. Но это не соответствует действительности, потому что при выполнении различных технологических операций участвуют разные гидроагрегаты, которые в разной степени влияют на изменение продолжительности операций и продолжительность цикла в целом. Поэтому падение производительности будет иметь некорректную скорость падения от наработки.

Проведенные исследования позволяют определить оптимальную периодичность тех-

нических воздействий, направленных не только на обеспечение работоспособного технического состояния, но и снижение потерь от падения производительности.

В работе канд. техн. наук В.И. Сидорова говорится о том, что все элементы дорожно-строительной машины можно разделить на две группы: первая из них, которая непосредственно влияет на производительность машины, снижение ее работоспособности и вторая, которая не имеет такого влияния, но отказ которой приводит к полной потере работоспособности, например подшипники качения или скольжения [1]. В данной работе рассматривается влияние на падение производительности и ухудшение технического состояния агрегата – двигателя внутреннего сгорания, элементов ГП. Однако рассматривается обобщенное влияние ухудшения технического состояния транспортно-технологических машин на снижение мощности ДВС, объемного КПД без привязки к конкретным узлам и агрегатам.

В вышеизученных работах при расчете динамики производительности не учитываются фактические значения параметров работы ГРО, которые будут влиять на значение объемного КПД, а именно – рабочее давление, частота вращения коленчатого вала.

Расчет часовой эксплуатационной производительности определяется по известным зависимостям¹⁶ [3, 4, 5, 8, 9, 10, 14]. Для расчета часовой эксплуатационной производительности с учетом снижения надежности узлов и агрегатов ниже представлена следующая формула:

$$П(t) = 60 \frac{q \cdot n_{\text{ц}}(t) \cdot K_{\text{н}}}{K_{\text{р}}} K_{\text{в}}, \quad (1)$$

где q – вместимость ковша; $n_{\text{ц}}(t)$ – количество циклов за минуту, циклов в минуту; $K_{\text{н}}$ – коэффициент наполнения; $K_{\text{р}}$ – коэффициент разрыхления; $K_{\text{в}}(t)$ – коэффициент использования машины по времени.

¹¹ Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин. М.: Машиностроение, 1977. 288 с.

¹² Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация): учеб. пособие / В.Б. Пермяков, В.И. Иванов, С.В. Мельник [и др.]; под ред. В.Б. Пермякова. 752 с.

¹³ Харазов А.М. Методы оптимизации в технической диагностике машин: научное издание / А.М. Харазов, С.Ф. Цвид. 132 с.

¹⁴ Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. 112 с.

¹⁵ Харазов А.М. Методы оптимизации в технической диагностике машин: научное издание. 132 с.

¹⁶ Машины для земляных работ: учебник для студентов, обучающихся по направлению 270100 «Строительство» / А.И. Доценко [и др.]. М.: Бастет, 2012. 687 с.

Количество циклов экскавации за одну минуту (60 с) определяется по формуле

$$n_{\text{ц}}(t) = \frac{60}{t_{\text{ц}}(t)} = \frac{60}{\sum_{z=1}^Z t_z(t)} = \frac{60}{t_{\text{к}}(t) + t_{\text{про}}(t) + t_{\text{пп}}(t) + t_{\text{р}}(t) + t_{\text{ппп}}(t) + t_{\text{оро}}(t)} = \frac{60}{\sum_{z=1}^Z \frac{A_z}{N_z}}, \quad (2)$$

где $t_z(t)$ – функция продолжительности выполнения технологических операций z -го номера от наработки, с; A_z , N_z – величина затрачиваемой работы на выполнение технологической операции z -го номера, мото-час; $t_{\text{ц}}(t)$ – продолжительность цикла экскавации, с; $t_{\text{к}}(t)$ – продолжительность копания, с; $t_{\text{про}}(t)$, $t_{\text{оро}}(t)$ – продолжительности соответственно подъема и опускания рабочего органа в забой, с; $t_{\text{пп}}(t)$ – продолжительность поворота платформы, с; $t_{\text{р}}(t)$ – продолжительность разгрузки экскаватора, с; $t_{\text{ппп}}(t)$ – продолжительность порожнего поворота платформы в забой, с.

Изначально приведем метод расчета для определения продолжительности разработки и набора грунта в ковш.

Продолжительность разработки и набора грунта в ковш ЭО от наработки определится по формуле

$$t_{\text{к}}(t) = \frac{q \cdot K_{\text{н}} \cdot K_1 \cdot K_{\text{рз}} \cdot K_{\text{э}}}{N_{\text{к}}(t) \cdot K_{\text{р}}}, \quad (3)$$

где q – вместимость ковша экскаватора, м³; $K_{\text{н}}$ – коэффициент наполнения ковша грунтом; K_1 – коэффициент удельного сопротивления копания грунта, кН/м²; $K_{\text{рз}}$ – коэффициент затупления режущих элементов, $K_{\text{рз}} = 0,8^{17}$; $K_{\text{э}}$ – коэффициент энергоемкости, назначаемый для песчаных грунтов 0,80...0,92, 0,87...0,88 для суглинков, 0,82...0,94 для глин¹⁸; $N_{\text{к}}(t)$ – функция мощности от наработки, необходимая для копания, кВт; $K_{\text{р}}$ – коэффициент разрыхления грунта.

Коэффициент удельного сопротивления копания грунта K_1 зависит от разных факторов, скорости копания, физико-механических свойств грунта. Расчет K_1 был получен с использованием следующих параметров: ма-

тематического ожидания среднего рабочего давления в ГРО (таблица 1), ширины ковша – 1,41 м, длины рукояти – 3,2 м, внутреннего диаметра гидроцилиндра рукояти – 0,17 м, толщины срезаемой стружки – 0,25 м. В результате проведения расчетов среднее касательное усилие резания составило 65,8 кН, удельное сопротивление копанию $K_1 = 186,7$ кН/м², что соответствует II категории грунта (согласно ГОСТ 17343–71).

Для определения мощности, необходимой для разработки и набора грунта, воспользуемся формулой

$$N_{\text{к}}(t) = P_{\text{ср}}(t) \cdot Q(t) \cdot k_{\text{вых}} \cdot \eta_{\text{гм}} \cdot \eta_{\text{об}}(t) \cdot \eta_{\text{ш}}^m, \quad (4)$$

где $P_{\text{ср}}(t)$ – функция среднего давления при разработке и наборе грунта от наработки, Н/м²(Па); $Q(t)$ – подача гидравлической жидкости в гидроприводе ЭО от наработки, м³/с; $k_{\text{вых}}$ – коэффициент снижения выходной мощности ДВС вследствие колебания нагрузки $k_{\text{вых}} = 0,90$; – КПД, учитывающий гидромеханические потери элементов гидропривода, в расчетах принимался 0,84 [15]; – КПД механизма поворота элемента рабочего органа, учитывающий потери на трение в шарнирах ковша, рукояти, $\eta_{\text{ш}} = 0,95$ для одного смазанного шарнира; m – количество шарниров у ковша, рукояти; $\eta_{\text{об}}(t)$ – объемный КПД элементов гидропривода.

Подача гидравлической жидкости в гидроприводе ЭО от наработки определяется по формуле

$$Q(t) = V \cdot n(t), \quad (5)$$

где V – рабочий объем двухсекционного гидронасоса (для исследуемой модели гидронасоса $158 \cdot 10^{-3} \dots 302 \cdot 10^{-3}$), м³/об; $n(t)$ – функция ЧВКВ от наработки, об/с.

С учетом вышеприведенных зависимостей формула (2) примет следующий вид:

$$t_{\text{к}} = \frac{q \cdot K_{\text{н}} \cdot K_1 \cdot K_{\text{рз}} \cdot K_{\text{э}}}{P_{\text{ср}}(t) \cdot V \cdot n(t) \cdot \eta_{\text{об}} \cdot k_{\text{вых}} \cdot \eta_{\text{гм}} \cdot \eta_{\text{ш}}^m \cdot K_{\text{р}}}. \quad (6)$$

Для технологической операции «разработка и набор грунта» рабочего цикла ЭО исследуется следующая совокупность элементов

¹⁷ Кабашев Р.А., Кульгильдинов М.С. Исследование процесса копания гидравлическим экскаватором ЭО-3122 с изношенными зубьями // Проблемы совершенствования и моделирования дорожной техники и технологических процессов строительства автомобильных дорог и автотранспорта: тезисы докл. Алма-Ата, 1992. 183 с.

¹⁸ Крикун В.Я., Манасян В.Г. Расчет основных параметров гидравлических экскаваторов с рабочим оборудованием обратная лопата: учебное пособие. Изд. 1-е. М.: АСВ, 2001. 104 с.

ГРО: гидронасос – гидрораспределитель – гидроцилиндры. Именно для этой совокупности элементов ниже представлена формула расчёта объемного КПД:

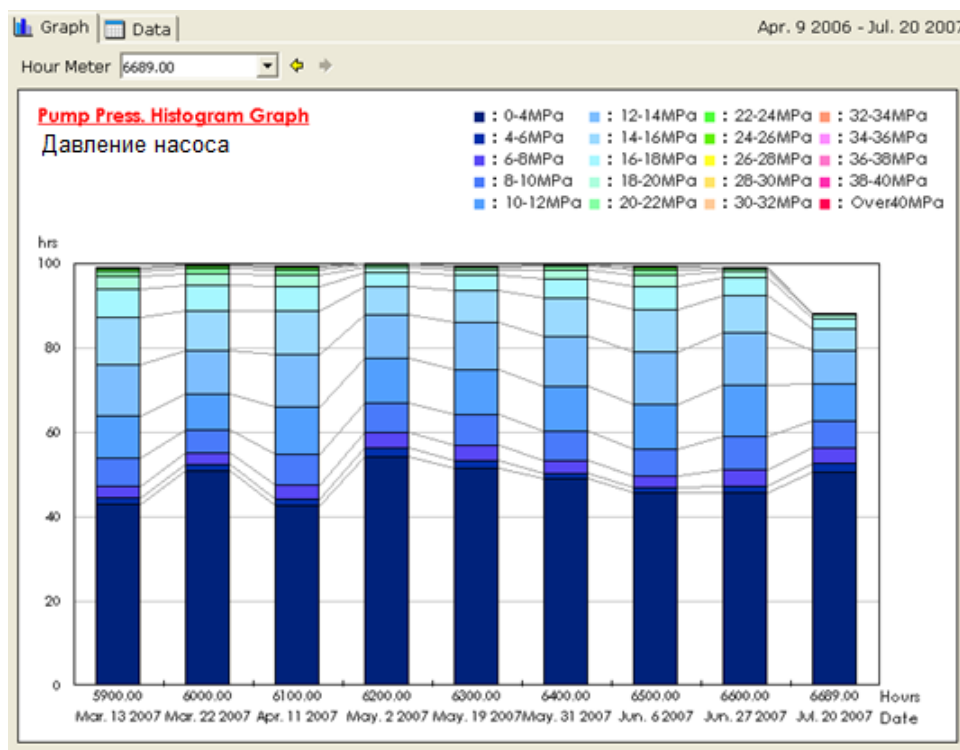
$$\eta_{об}(t) = \eta_{об}^{гн}(t) \cdot \eta_{об}^{р}(t) \cdot \eta_{об}^{гц}(t), \quad (7)$$

где $\eta_{об}(t)$ – функция общего объемного КПД ГРО, при выполнении технологической операции «разработка и набор грунта» от наработки; $\eta_{об}^{гн}(t)$, $\eta_{об}^{р}(t)$, $\eta_{об}^{гц}(t)$ – объемные КПД от наработки соответственно гидронасоса, гидрораспределителя, гидроцилиндров рабочего оборудования.

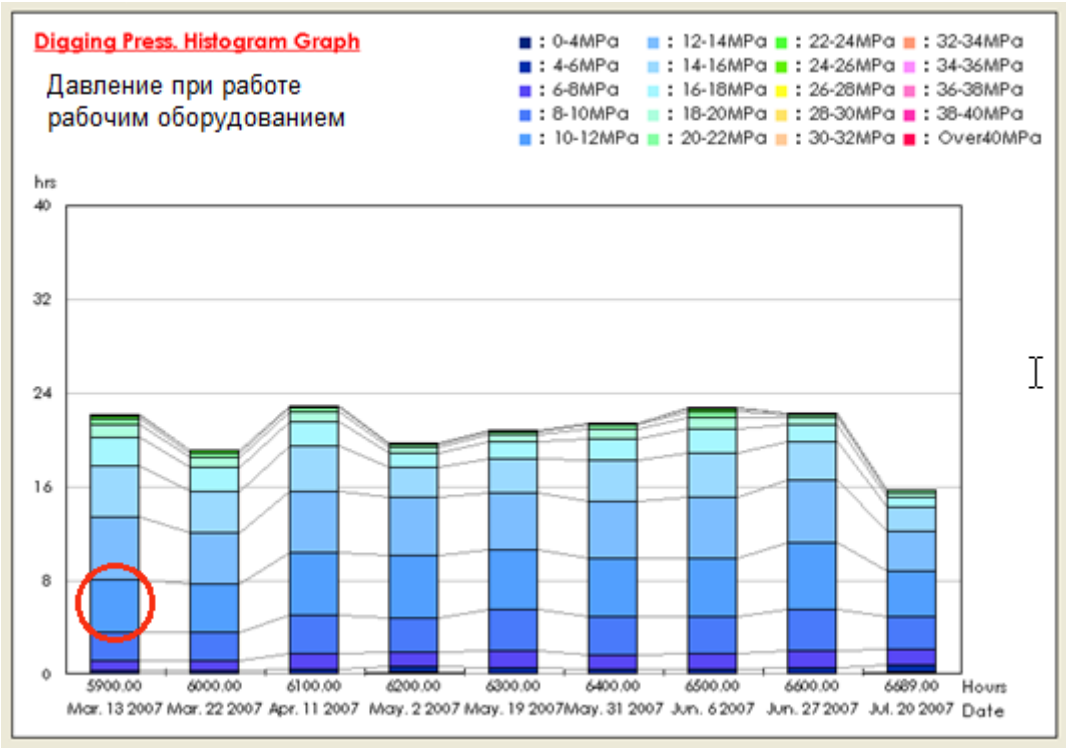
Для получения информации по параметрам рабочего давления в ГРО, ЧВКВ был проведен сбор данных с системы встроенной бортовой диагностики, позволяющей осуществлять мониторинг диагностических параметров ЭО. Считываемая информация может накапли-

ваться на протяжении нескольких тысяч мото-часов. В исследуемом случае информация была накоплена в течение 9 140 мото-часов. Для извлечения результатов измерения параметров применяется фирменный диагностический сканер, представляющий собой считывающее устройство (диагностическую колодку с кабелем), подключаемое к переносному компьютеру с программным обеспечением или программно-диагностическим комплексом MICDataviewer. Программное обеспечение сканера исследуемой модели ЭО позволяет не только выводить параметры в режиме онлайн, но и скачивать их в виде файла для последующей обработки в среде MS Excel, Statistika и других программах.

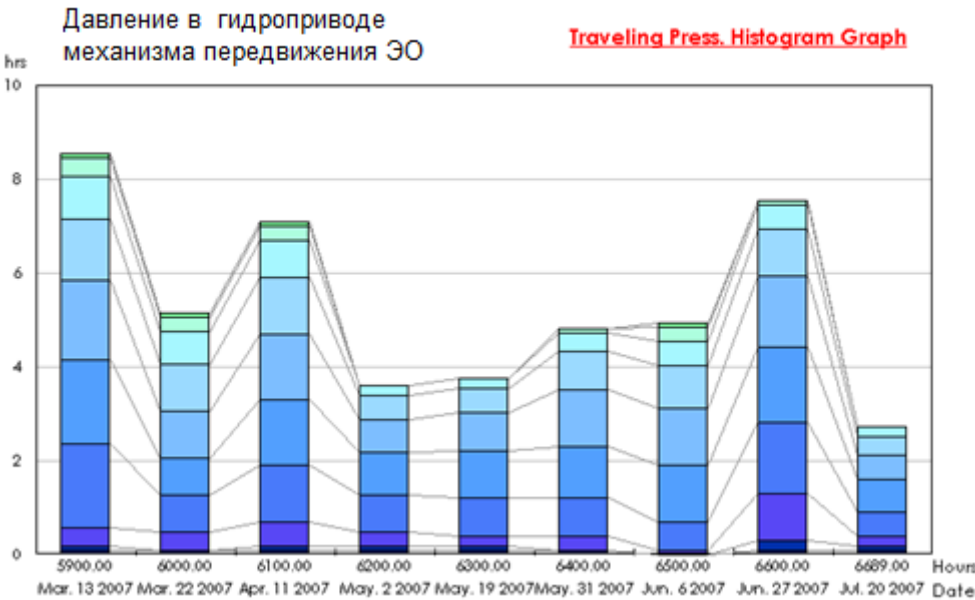
Величины параметров выдаются в виде гистограммы с долевым распределением по времени (рисунок 1, а, б, в).



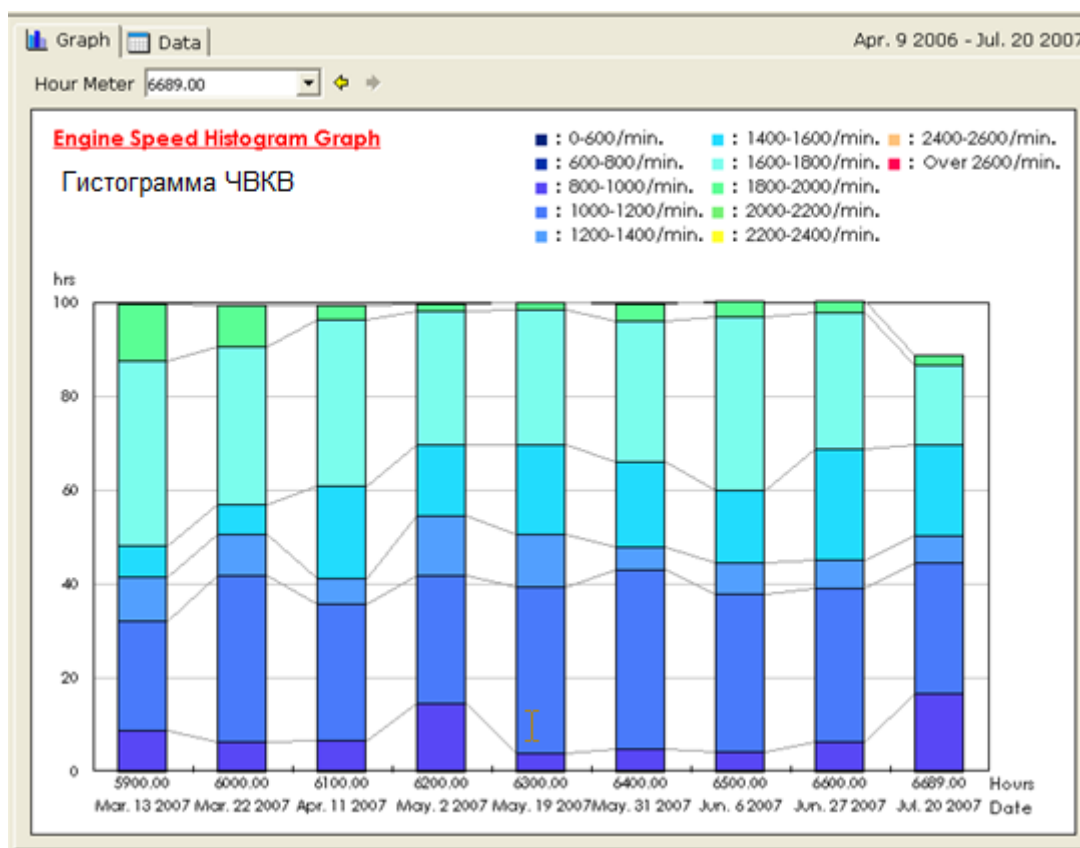
а



6



6



г

Рисунок 1 – Гистограммы давления рабочей жидкости, частоты вращения коленчатого вала, представленные с помощью программного диагностического комплекса экскаватора производства компании Hitachi:

а – при выполнении всех технологических операций, перемещении и работе на холостом ходу двигателя внутреннего сгорания;

б – давление при работе стрелы, рукояти;

в – при работе гидропривода механизма перемещения ЭО;

г – частота вращения коленчатого вала

Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Histograms of the pressure of the working fluid, the speed of rotation of the crankshaft, presented using the diagnostic software package of the Hitachi companies excavator:

a – when performing all technological operations, moving and operating the internal combustion engine at idle;

b – pressure during operation of the boom, handle;

c – when operating the hydraulic drive of the excavator movement mechanism;

d – the speed of rotation of the crankshaft

Source: compiled by the authors.

Например, доля времени работы на диапазоне величин давления от 10 до 12 МПа составляет 4,5 мото-часа (обведен окружностью красного цвета) при моменте наработки 5900 мото-часов (см. рисунок 1, б). Результаты измерения параметров в определенных диапазонах распределены через каждые 100 мото-часов. Разработанная программой фирмой Хитачи выводит информацию о давлении в гидросистеме при работе отдельно: рабочего оборудования (стрелы, рукояти), механизма перемещения машины и всех операций в со-

вокупности, включая холостой ход ДВС и ГП машины. Для измерения продолжительности работы в определенных диапазонах давления и при различных технологических операциях система бортового диагностирования имеет встроенные датчики, которые установлены в корпусах гидравлических насосов, а также корпусах основного и системы управления гидрораспределителей (гидравлические контуры механизма передвижения, механизма вращения поворотной части, движения рукояти к стреле, подъема стрелы).

Таблица 1
Продолжительность времени работы рабочего оборудования экскаватора при различных величинах давления за 100 мото-часов работы двигателя внутреннего сгорания
Источник: составлено авторами.

Table 1
The operating time of the excavator's working equipment at different pressure values for 100 hours of operation of the internal combustion engine
Source: compiled by the authors.

Среднее давление в гидросистеме рабочего оборудования	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Фактическое время работы в указанном диапазоне давления, мото-часов	0,3	0,8	2,4	4,5	5,3	4,3	2,4	1,1	0,5	0,2

Программа фиксирует продолжительность работы систем машины (рабочего оборудования, механизма поворота платформы, механизма перемещения) и выводит информацию сервисному инженеру на монитор компьютера. Каждый диапазон параметра обозначается цветом от темно-синего до красного, например, темно-синий фон – это диапазон от 0 до 4 МПа, желтый – от 26 до 28 МПа и т. д. (см. рисунок 1, а, б, в).

Помимо продолжительности давления была считана и обработана информация по параметру ЧВКВ. Диапазон ЧВКВ также установлен с фиксированным шагом 200 об/мин, например, 600–800 об/мин, 800–1000 об/мин, ..., 2000–2200 об/мин. Было принято допущение о том, что данный параметр будет исследоваться с диапазона величин 1000–1200 об/мин с учетом того, что остальное время ЭО работает на холостом ходу (рисунок 1, г). Как показали исследования ЭО модели ZX 330, средний коэффициент потерь времени на холостой ход от общей продолжительности работы ДВС составляет $K_{xx} = 0,28$, т.е. продолжительность времени работы ЭО на ЧВКВ до 1200 об/мин прямо пропорционально разделялась между полезной работой и работой на холостом ходу ДВС (см. рисунок 1, г).

Первоначально исследования были проведены по давлению в ГРО (движение рукояти к стреле, подъем стрелы). В программе приводится обобщенная информация о продолжительности работы в определенном диапазоне давления элементами рабочего оборудования, стрелы (при подъеме) и рукояти (при движении к стреле). Среднее значение диапазона, например, для диапазона 6–8 МПа принималось 7 МПа. Давление до 6 МПа не принималось в учет, т.к. видно из диаграмм,

что оно составляет в среднем 3% при перемещении и выполнении рабочих операций. Средние значения параметров были получены по формуле

$$P_{\text{ф ср}} = \sum_{d=1}^D \frac{P_{\text{ср}}^d}{T_{\text{изм}}} \cdot t_d, \quad (8)$$

где $P_{\text{ф ср}}$ – фактическое среднее значение параметра, ед. изм.; $P_{\text{ср}}^d$ – среднее значение исследуемого диапазона, ед. изм.; t_d – продолжительность работы в исследуемом диапазоне, ч; $T_{\text{изм}}$ – наработка исследуемого оборудования или механизма, за 100 мото-часов (см. рисунок 1).

Приведем пример расчета среднего фактического давления гидравлической жидкости при работе рабочего оборудования для интервала наработки 5800–5900 мото-часов ЭО модели ZX 330, $T_{\text{изм}} = 21,8$ мото-часа за 100 мото-часов работы ДВС (см. рисунок 1, б, таблицу 1).

Подставляя данные в формулу (1), получим $P_{\text{ф ср}} = 15,23$ МПа. Таким образом, было обработано 1329 значений на интервале наработки от 0 до 9140 мото-часов. По такой же методике были получены средние фактические значения для параметра ЧВКВ.

Техника эксплуатировалась на строительных площадках Московской и Омской областей. Полученные данные были обработаны по девятнадцати единицам одноковшовых гидравлических экскаваторов моделей ZX 330 производства фирмы «Хитахи» (Япония), мощностью ДВС 185–202 кВт, массой 31 т, вместимостью ковша 1,4 м³. Встроенной бортовой системой помимо вышеперечисленных параметров контролируется температура охлаждающей и гидравлической жидкости.

Таблица 2
Статистические характеристики рабочего давления в ГРО
для операции ЭО «разработка и набор грунта»
Источник: составлено авторами.

Table 2
Statistical characteristics of the working pressure in GRO
for the 'digging ground' EO operation
Source: compiled by the authors.

Статистические характеристики	Наименование параметра	
	Рабочее давление в ГРО, МПа	Скорость падения давления в ГРО для операции «разработка и набор грунта», МПа/мото-ч
Математическое ожидание	14,98	$3,17 \cdot 10^{-4}$
Среднеквадратическое отклонение	1,73	$2,2 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент вариации	0,12	0,69

Эксплуатация ЭО проводилась в умеренной климатической зоне, круглогодично, при разработке II и III категорий грунтов, коэффициент использования номинального давления в среднем составил 0,53 (средний режим работы гидропривода) [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Авторами уделено внимание параметрам – рабочее давление в ГРО, ЧВКВ в процессе выполнения технологических операций, т.к. изменение этих параметров напрямую влияет на продолжительность выполнения технологических операций, в том числе и на разработку с набором грунта в ковш – одной из самых энергоемких операций цикла экскавации [14, 25, 27].

По результатам обработки данных, по каждой из машин с применением программы Statistika 6.0 были получены графическая, аналитическая регрессионные зависимости, определены величины падения давления в ГРО на исследуемом интервале наработки, а также характеристики случайных величин нормального закона распределения, скорости падения данного параметра (таблица 2, рисунок 2). Для более детального изучения поставленного вопроса были построены гистограмма эмпирических частот давления в ГРО, теоретическая кривая, соответствующая

нормальному закону распределения (рисунок 3).

Учитывая коэффициент вариации рабочего давления в процессе копания грунт наиболее близок к суглинкам, глине¹⁹.

$$P_{cp}(t) = -0,0002 \cdot t + 15,702, \tag{9}$$

где P_{cp} – средняя величина рабочего давления при разработке и наборе грунта, МПа, t – наработка, мото-ч.

По результатам анализа наблюдается снижение исследуемого параметра в среднем на 12,7% на интервале наработки от 0 до 10 000 мото-часов. Максимальная величина падения давления отдельно взятой единицы ЭО составляет 4,63 МПа, минимальная – 0,4 МПа на исследуемых интервалах наработки.

Технология измерения объемного КПД предполагает измерение при номинальном давлении^{20,21}. Для исследуемой модели согласно технической информации, предоставленной представителем завода-изготовителя ЭО модели ZX 330, номинальное давление в гидросистеме соответствует максимальному и составляет 34,3 МПа. В статье приведен расчет изменения объемного КПД ЭО модели ZX 330 при давлении в гидросистеме 20 МПа, т.к. при данном значении этого параметра наблюдается наибольшая гидравлическая мощность.

¹⁹ Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин. М.: Машиностроение, 1977. 288 с.
²⁰ Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. 112 с.
²¹ Техническая диагностика гидравлических приводов / Т.В. Алексеева, В.Д. Бабанская, Т.М. Башта и др.; под общ. ред. Т.М. Башты. М.: Машиностроение.1989. 264 с.



Рисунок 2 – Изменение давления в ГРО при разработке и наборе грунта ЭО марки ZX 330 с течением наработки (доверительные границы указаны с вероятностью 0,95)
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Pressure change in hydraulic system during excavation and earthmoving ZX 330 EOs with operating hours (confidence limits are indicated with a probability of 0.95)
 Source: compiled by the authors.

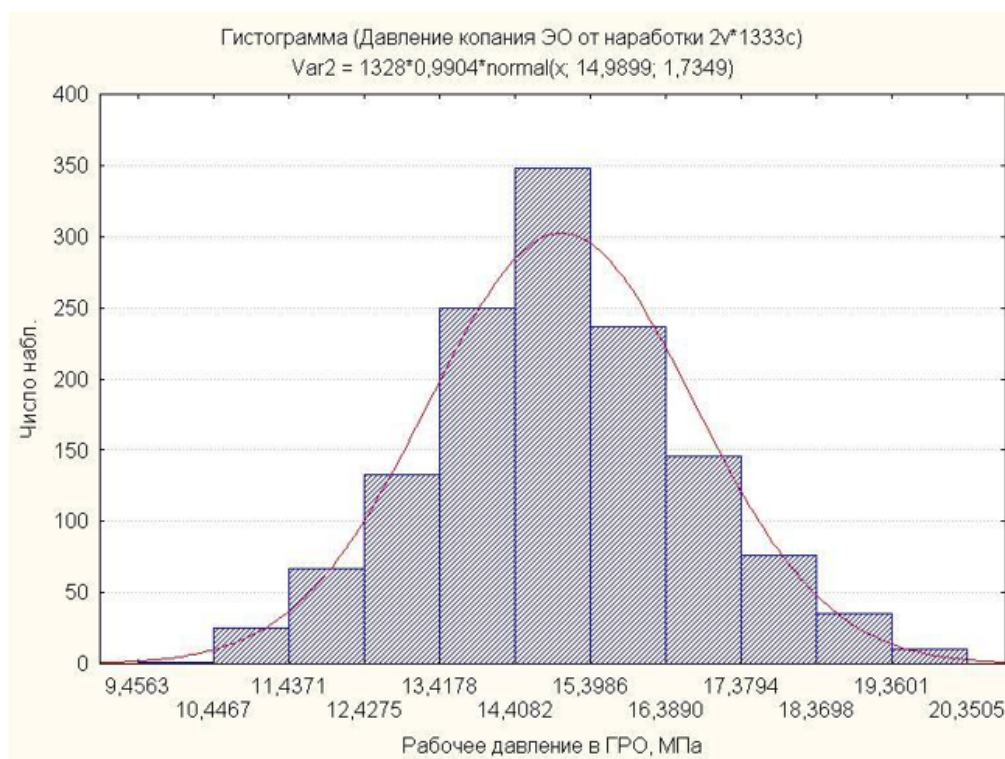


Рисунок 3 – Гистограмма эмпирических частот и теоретической кривой рабочего давления в ГРО экскаватора при разработке и наборе грунта
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Histogram of empirical frequencies and theoretical working pressure curve in the excavator during soil digging
 Source: compiled by the authors.

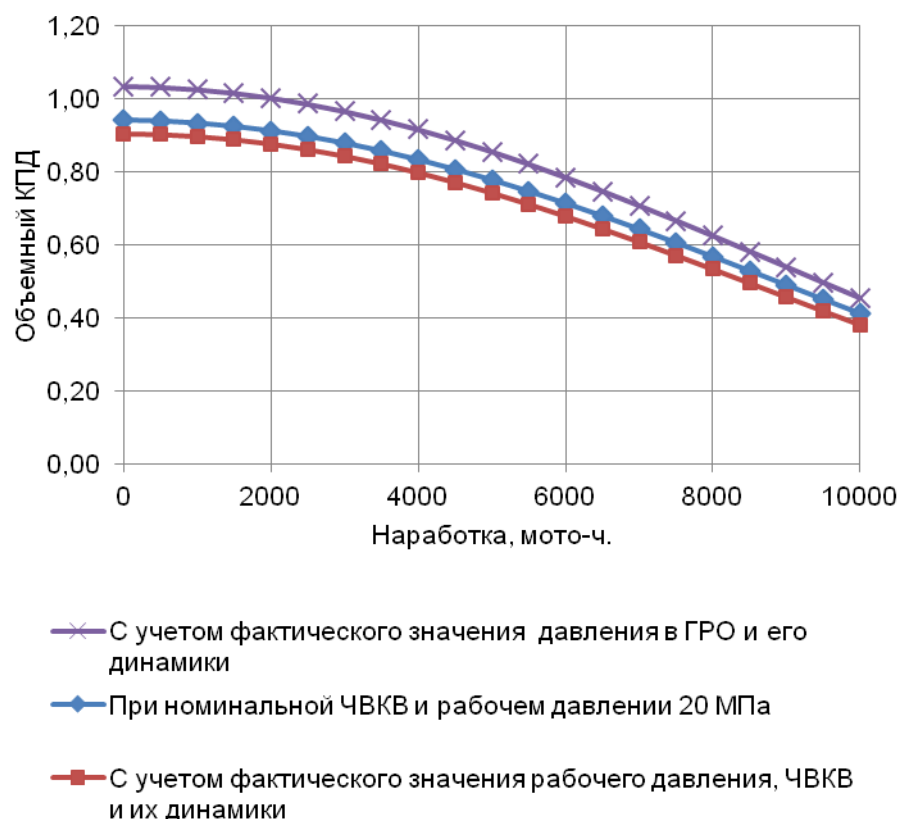


Рисунок 4 – Зависимость объемного КПД элементов гидропривода для операции «разработка и набор грунта» от наработки
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of the volumetric efficiency of the hydraulic drive elements for the 'digging ground' operation from the time since the beginning
Source: compiled by the authors.

Далее были построены зависимости изменения объемного КПД при среднем рабочем давлении и при 20 МПа в ГРО для операции «разработка и набор грунта» (рисунок 4).

Динамика величин объемных КПД в зависимости от наработки элементов ГП для исследуемой марки ЭО принимались по верхним доверительным границам, величины которых приведены в источнике²².

Как видно из рисунка 4, величина объемного КПД ГРО при среднем рабочем давлении выше, чем при 20 МПа на 9%. Это объясняет-

ся тем, что при меньшем значении рабочего давления подача повышается. Поэтому при расчетах динамики производительности этот факт необходимо учитывать²³. Снижение общего объемного КПД ГРО при 10 000 мото-часов достигает значения 0,41, что значительно ниже допустимого значения 0,60 (для среднего режима работы ГРО), однако авторы в данной статье не рассматривают вывод машины из эксплуатации, повышение коэффициента использования двигателя внутреннего сгорания по мощности²⁴.

²² Гринчар Н.Г. Надежность гидроприводов путевых, строительных и грузоподъемных машин: учеб пособие для вузов. М.: МИИТ, 2001. 112 с.

²³ Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. 112 с.

²⁴ Надежность строительных машин / Г.П. Гриневиц, Е.А. Каменская, А.К. Алферов [и др.] 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1983. 296 с.

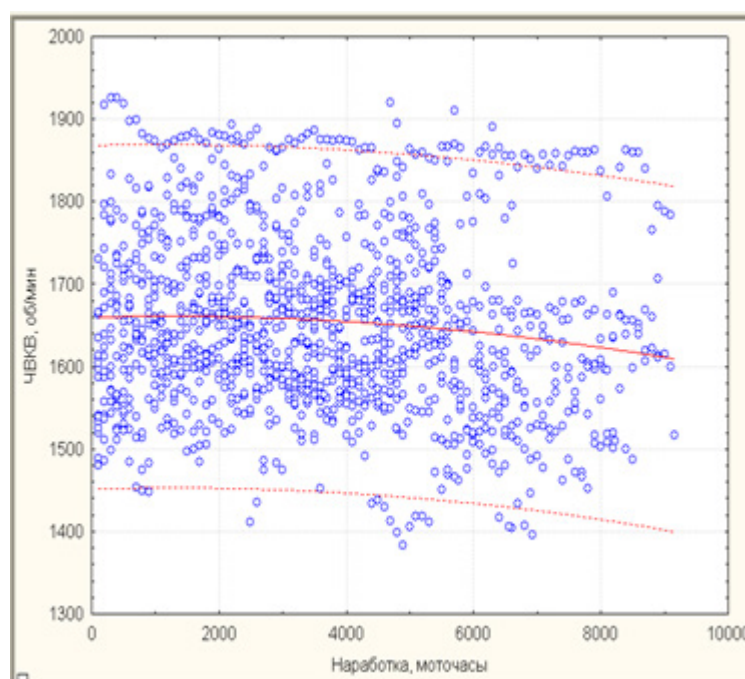


Рисунок 5 – Зависимость изменения частоты вращения коленчатого вала с течением наработки для исследуемой модели ЭО (доверительные границы указаны с вероятностью 0,95)
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – The dependence of the change in the crankshaft rotation frequency on the time elapsed since the start of work for the excavator model under study (confidence limits are indicated with a probability of 0.95)
Source: compiled by the authors.

На величину снижения подачи рабочей жидкости в гидросистеме влияет не только негерметичность внутренних сопряжений, изменение начальных кинематических соотношений, но и ухудшение технического состояния ДВС, по причине которого понижается частота вращения коленчатого вала [8]. На рисунке 5 представлена зависимость изменения ЧВКВ с течением наработки для исследуемой модели ЭО. Ниже приведена аналитическая зависимость функции ЧВКВ от наработки.

$$n(t) = -8 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 0,002 \cdot t + 1659,9. \quad (10)$$

В результате анализа полученных зависимостей снижение среднего значения рабочей ЧВКВ на интервале наработки от 0 до 10 000 мото-часов составляет изменение – 4% или 60 об/мин. Полученная зависимость была использована при расчёте производительности ЭО. В нормативах технического обслуживания исследуемой модели ЭО предписана ре-

гулировка ЧВКВ в случае ее снижения более чем на 50 об/мин. Причиной снижения ЧВКВ являются повышение негерметичности камеры сгорания ДВС, неисправности в системах топлива и воздухоподачи. Следовательно, необходимо в процессе эксплуатации уделять внимание данному техническому параметру и своевременно осуществлять его проверку и регулировку.

С учетом полученных уравнений по формуле (4) были рассчитаны и построены зависимости мощности, необходимой для разработки и набора грунта от наработки (рисунок 6). При расчете гидравлической мощности была учтена динамика ЧВКВ ЭО модель ZX 330 (см. рисунок 5).

Анализ полученных результатов, представленных графическими зависимостями на рисунке 6, позволил установить среднюю разницу по величине реализуемой гидравлической мощности в 38%.

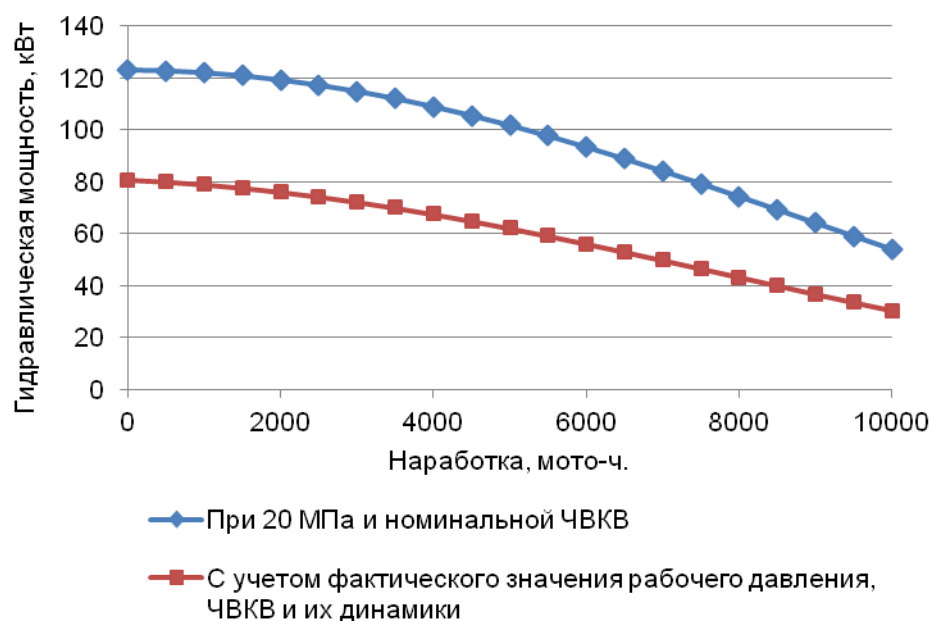


Рисунок 6 – Зависимость гидравлической мощности ЭО модели ZX 330 от наработки для операции «разработка и набор грунта»
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The dependence of the hydraulic power of model ZX 330 excavator on the time elapsed since the start of work for 'digging ground' operation
Source: compiled by the authors.

Как показывают исследования, несмотря на меньшее значение объемного КПД, в течение наработки наибольшая величина гидравлической мощности наблюдается при давлении 20 МПа для исследуемой модели ЭО (см. рисунки 4, 6). На рисунке 7 приведены графические зависимости полезной гидравлической мощности в диапазоне от 12 до 34,3 МПа в начале эксплуатации и при предельном техническом состоянии.

При расчете гидравлической мощности нового насоса, подставляя данные регуляторной характеристики в формулу (4), была получена зависимость (верхняя кривая бордового цвета, см. рисунок 7).

Далее, учитывая величину падения объемного КПД от наработки элементов ГП, равную 0,60 (для среднего режима работы гидропривода)²⁵, соответствующую предельному техническому состоянию, и подставив значения

в формулу (4), был получен график (нижняя кривая синего цвета, см. рисунок 7).

Величина падения гидравлической мощности в области 20 МПа имеет наибольшее значение (37 кВт), а при 12 МПа (24 кВт) наименьшее. Тем не менее эксплуатация ЭО при значении давления 20 МПа при предельном техническом состоянии не теряет своей целесообразности и является более предпочтительной для обеспечения наибольшей по величине производительности.

Для обеспечения роста эффективности среднее повышение данного показателя должно составлять 25%, что позволит снизить энергозатраты, повысить мощность до 20%. Одним из мероприятий, позволяющих повысить рабочее давление, является увеличение толщины разрабатываемой стружки грунта в процессе резания, применение ковшей с большей или изменяемой геометрической вместимостью²⁶.

²⁵ Надежность строительных машин / Г.П. Гриневич, Е.А. Каменская, А.К. Алферов [и др.] 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1983. 296 с.

²⁶ Салихов Р.Ф., Груснев М.Г.; ГОУ ВПО «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)» Раздвижной ковш. Патент № 100531 РФ, МКП E02F 3/40. № 2010135571/03; Заявл. 25.08.2010; Оpubл. 20.12.2010 Бюл. № 35.

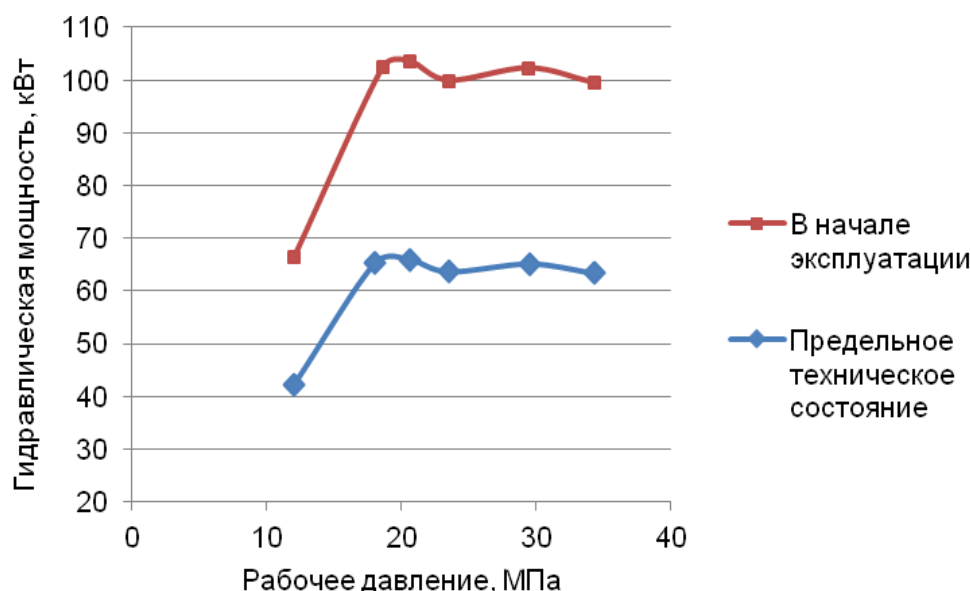


Рисунок 7 – Зависимости гидравлической мощности от величины рабочего давления при разных технических состояниях для операции «разработка и набор грунта»
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The dependence of hydraulic power on the value of the operating pressure with a serviceable and marginal technical condition of the excavator for 'digging ground' operation
Source: compiled by the authors.

Помимо исследования изменения рабочего давления на операции «разработка и набор грунта» был проведен анализ параметров рабочего давления на всех технологических операциях (включая операцию «перемещение»). В ходе обработки полученных данных с бортового компьютера выявлено то, что операция перемещения занимает от 9 до 11% всей продолжительности эксплуатации (см. рисунок 1, в). Авторы приняли допущение, что учет рабочего давления при перемещении в общей выборке параметров незначительно повлияет на математическое ожидание этого показателя для остальных технологических операций рабочего цикла. Было принято допущение о том, что общее давление в гидросистеме исследовалось с величины 4 МПа с учетом того, что остальное время ЭО работы на данной величине и ниже приходится на холостой ход ($K_{xx} = 0,28$) (см. рисунок 1, а). Средняя величина рабочего давления для всех технологических операций рабочего цикла приведена ниже:

$$P_{cp}(t) = -0,0002 \cdot t + 14,074, \quad (11)$$

где $P_{cp}(t)$ – средняя величина рабочего давления при выполнении технологических операций цикла экскавации ЭО, МПа, t – наработка, мото-ч.

Как видно из полученных зависимостей (см. формулы (9) и (11), различия между ними составляют 12%, это объясняется тем, что при возвращении в забой давление в гидросистеме снижается до 4 МПа, а операция «разработка и набор грунта» является одной из наиболее энергоемких операций рабочего цикла [27].

Также проведены исследования по коэффициенту использования ЭО по времени, о методике расчета которого с учетом современных средств контроля продолжительности рабочего времени будет подробно изложено в последующих статьях. По результатам проведенных исследований средний коэффициент использования ЭО по времени составил 0,43.

Данные исследования позволяют повысить точность прогнозирования изменения эксплуатационной производительности ЭО с течением наработки.

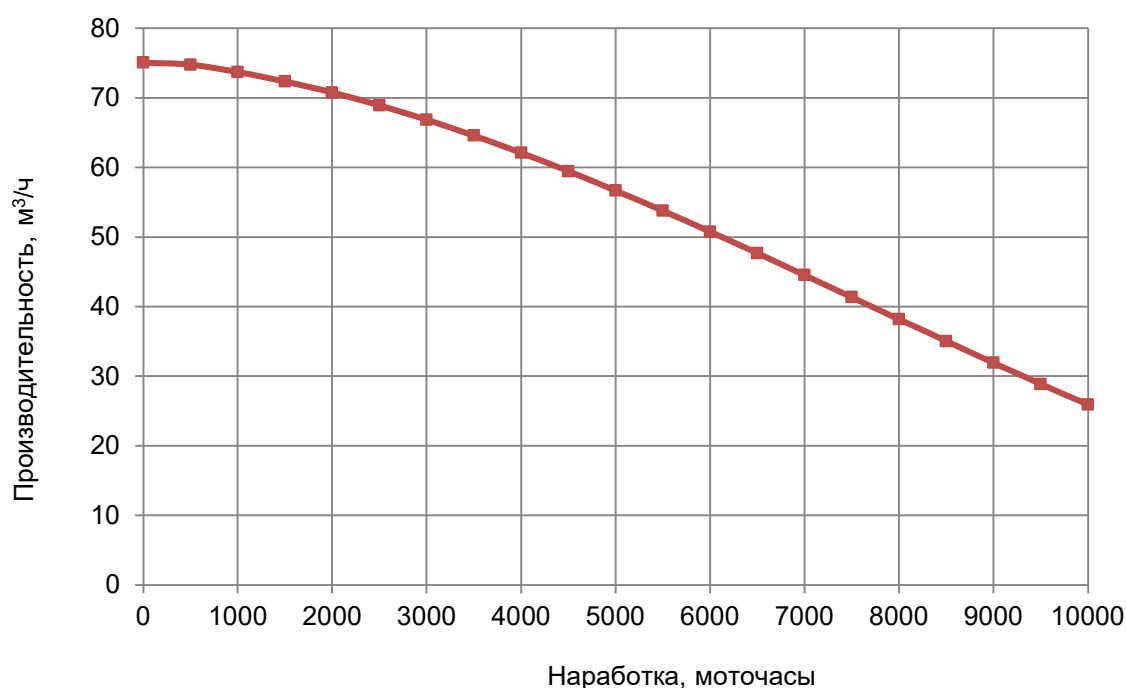


Рисунок 8 – Изменение часовой эксплуатационной производительности ЭО марки ZX 330 от наработки
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The dependence of the hourly productivity of the excavator of ZX 330 model on the time elapsed since the start of work
Source: compiled by the authors.

Значительную долю потерь мощности вносит ухудшение технического состояния основного гидронасоса, гидромотора поворота платформы, затупление режущих элементов, снижение мощности ДВС из-за износа ЦПГ, системы питания [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Авторами принято допущение о том, что полученные зависимости рабочего давления в ГРО от наработки учитывают влияние ухудшения технического состояния подсистем ЭО.

Расчет технологических операций рабочего цикла ЭО проводился с учетом среднего значения рабочего давления, частоты вращения коленчатого вала (формулы (10), (11)). Для расчета эксплуатационной производительности ЭО воспользуемся формулами (1), (2) (см. рисунок 8)²⁷ [3, 4, 5, 8, 9, 10, 14].

Анализ полученной закономерности (см. рисунок 8) свидетельствует о том, что при изменении вышеперечисленных параметров, в том числе давления в ГРО, сокращение среднего значения часовой эксплуатационной производительности за период наработки от 0 до 10 000 мото-часов составит 65% при условии, того что коэффициент использования ДВС по мощности равен 0,59. В расчетах не приводится также влияние динамики температуры рабочей жидкости на снижение КПД, влияние данного параметра можно учитывать применительно к местным условиям эксплуатации.

Таким образом, представленная методика расчета часовой эксплуатационной производительности позволяет спрогнозировать динамику данного показателя с течением наработки.

²⁷ Машины для земляных работ: учебник для студентов, обучающихся по направлению 270100 «Строительство» / А.И. Доценко [и др.]. М.: Бастет, 2012. 687 с.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

а) установлено то, что с увеличением наработки (интервал от 0 до 10 000 мото-часов) рабочее давление в гидросистеме рабочего оборудования снижается в среднем на 12,7–13,0%, получены регрессионные линейные зависимости, доверительные границы с вероятностью 0,95; характеристики случайных величин рабочего давления в гидросистеме рабочего оборудования, скорости падения данного параметра;

б) достигается повышение точности расчета изменения величины общего объемного КПД элементов гидропривода за счет применения регрессионной зависимости рабочего давления в гидросистеме. Величина объемного КПД при учете динамики среднего рабочего давления выше, чем при 20 МПа на 9% для исследованной модели ЭО;

в) расчеты показывают то, что наибольшее значение гидравлической мощности достигается при рабочем давлении 18–20 МПа. Как показали исследования, только 7% от всей продолжительности выполнения технологических операций ЭО соответствуют рекомендуемым требованиям. Необходимо повышать величину рабочего давления до рекомендуемого путем увеличения толщины срезаемой стружки в процессе набора грунта, применения ковшей с большей и изменяемой геометрической вместимостью, повышать скорость выполнения технологических операций, что позволит значительно повысить производительность и снизить энергозатраты, ориентировочно до 15%;

г) результаты расчетов аналитических регрессионных зависимостей средней величины рабочего давления всех технологических операций рабочего цикла, включая перемещение и отдельно операции «разработка и набор грунта», имеют расхождение 12%, что связано с тем, что копание является наиболее энергоемкой операцией по отношению к остальным;

д) установлено то, что с увеличением наработки частота вращения коленчатого вала снижается, получены регрессионная линейная зависимость, доверительные границы с вероятностью 0,95. В результате анализа полученных зависимостей снижение среднего значения рабочей частоты вращения коленчатого вала на интервале наработки от 0 до 10 000 мото-часов составляет 4%, что прямо пропорционально отражается на величине падения объемного КПД;

е) расчетная величина падения средней часовой эксплуатационной производительности ЭО с учетом ухудшения технического состояния, характеризуемого падением рабочего давления в гидросистеме частоты вращения коленчатого вала, составляет 65% при условии того, что коэффициент использования ДВС по мощности равен 0,59 на интервале наработки от 0 до 10 000 мото-часов для модели ЭО ZX - 330.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сидоров В.И. Управление восстановлением мощности силовых установок строительных и дорожных машин в эксплуатации // Труды МАДИ. 1975. Вып. 97. С 47–51.
2. Казакова Ю.Д., Вахрушев С.И. Исследование износостойкости рабочих органов строительных и дорожных машин в различных условиях эксплуатации // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2016. Т. 1. С. 310–319.
3. Салихов Р.Ф. Совершенствование методики прогнозирования изменения эксплуатационной производительности строительных машин от наработки // Механизация строительства. 2016. № 1. С. 29–32.
4. Салихов Р.Ф. Совершенствование методики прогнозирования изменения эксплуатационной производительности строительных машин от наработки // Механизация строительства. 2017. № 4. С. 46–50.
5. Салихов Р.Ф., Попков В.И. Методика расчета изменения производительности одноковшового гидравлического экскаватора в процессе наработки // Механизация строительства. 2018. Т. 79, № 3. С. 26–31.
6. Salikhov R.F., Permyakov V.B., Filippov Y.O., Grusnev M.G. A study of dynamics of the operational performance of a single-bucket excavator, taking into account the operating time during construction of transport infrastructure of oil and gas facilities // Journal of Physics: Conference Series this link is disabled. 2021. 1901(1).0120981313
7. Макацария Д.Ю., Кутузов В.В., Кутузова Е.В., Зезюлина Е.В. Влияние наработки с начала эксплуатации строительных и дорожных машин на показатели эффективности их использования // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. № 2. С. 36–43.
8. Определение технической и эксплуатационной производительностей дорожных машин на основе анализа объемов работ / С.М. Грушецкий, С.А. Евтюков, С.В. Репин, А.А. Кузнецов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 1. С. 38–52.
9. Дубровский Н.А., Веретенникова Е.С., Камеко О.А. Эксплуатационная производительность машин как показатель эффективности ее применения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки. 2021. № 5. С. 38–43. DOI 10.52928/2070-1632-2021-56-5-38-43

10. Грушецкий С.М., Евтюков С.А., Репин С.В., Карро Г.А. Производительность как качественный критерий оценки эффективности всех этапов системы жизненного цикла дорожных машин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2020. № 4 (63). С. 36–42.

11. Монгуш С.Ч., Чооду О.А., Евтюков С.А. Моделирование процессов влияния климатических факторов и рельефа местности на производительность наземных транспортно-технологических машин // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2019. № 3 (47). С. 108–111.

12. Максименко А.Н., Кутузов В.В., Сидоров А.Н. Влияние сезона и наработки с начала эксплуатации на производительность строительных и дорожных машин и себестоимость механизированных работ // Грузовик &. 2010. № 2. С. 16–21.

13. Фахратов М.А., Кужин М.Ф., Ибрагимов Р.И. Влияние автоматизированных систем управления грузоподъемных механизмов на производительность строительно-монтажных работ // Перспективы науки. 2020. № 1 (124). С. 62–65.

14. Павлов В.П. Основы системотехники многоцелевых землеройных машин: монография. Минобрнауки и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, Красноярский гос. тех. ун-т. Новосибирск: Изд-во СО РАН; Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 332 с.

15. Чмилъ В.П. Гидропневмопривод: монография. СПбГАСУ. СПб., 2010. 176 с.

16. Минин В.В., Мирзоян Г.С. Оптимизация параметров привода малогабаритных погрузчиков: монография. Красноярск: Изд. Красноярского университета, 1987. 160 с.

17. Салихов Р.Ф., Груснев М.Г. Влияние параметров силовой установки на технико-экономические показатели однокоровых гидравлических экскаваторов // Строительные и дорожные машины. 2010. № 4. С. 47–49.

18. Максименко А.Н., Кутузов В.В., Тимофеев Г.С., Васильев В.В. Учет и оценка эффективности использования каждой машины парка в строительстве // Вестник Белорусско-Российского университета. 2010. № 4. С. 21–28.

19. Оценка эффективности использования машин в строительном производстве / А.Н. Максименко [и др.] // Строительная наука и техника. 2008. № 5 (20). С. 37–43.

20. Grabovyy P.G., Zhikharev D.F. The productivity of an industrial housing construction enterprise as the main indicator of the potential intensity growth of the production and construction system Real Estate: Economics, Management. 2022. № 2. С. 11–17. DOI: 10.22337/2073-8412-2022-2-11-17

21. Чечуев В.Е. Методика расчета коэффициента сохранения эффективности строительных машин по данным эксплуатации // Строительные и дорожные машины. 2021. № 5. С. 15–20.

22. Репин С.В., Зазыкин А.В., Рулис К.В., Максимов С.Е. Методика формирования парка транспортно-технологических машин с использованием

лизинга и кредита // Вестник гражданских инженеров. 2017. 4(63). С. 209–218.

23. Евтюков С.А., Репин С.В., Грушецкий С.М., Карро Г.А. Формирование парка машин для строительства, реконструкции, ремонта и содержания автомобильных дорог с учетом этапов их жизненного цикла // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2020. № 3 (62). С. 62–68.

24. Куляшов И.Д., Чечуев В.Е., Кравец К.О. Влияние видов эксплуатации на эффективность и надежность парка строительных машин // Фундаментальные основы механики. 2023. № 11. С. 80–89.

25. Доценко А.И. Комплексный мониторинг параметров дорожных машин и асфальтобетонной смеси – основа повышения качества покрытий автомобильных дорог // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2018. № 2 (53). С. 89–93.

26. Салихов Р.Ф., Бердников И.Е. Метод расчета годовой продолжительности проведения технических обслуживаний и ремонтов для отечественных и зарубежных экскаваторов с течением наработки // Вестник СибАДИ. 2024;21(1):26–37. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-26-37>. EDN: HZWSMV

27. Тарасов В.Н., Коваленко М.В. Механика копания грунтов ковшом гидравлического экскаватора // Строительные и дорожные машины. 2003. № 8. С.41–45.

REFERENCES

1. Sidorov V.I. Power recovery management of power plants of construction and road machinery in operation. *Trudy MADI*. 1975; issue 97: 47–51. (in Russ.)

2. Kazakova Yu.D., Vakhrushev S.I. Research of wear resistance of working bodies of construction and road machinery in various operating conditions. *Sovremennye tehnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*. 2016; Vol. 1: 310–319. (in Russ.)

3. Salikhov R.F. Improving the methodology for predicting changes in the operational productivity of construction machines from operating time. *Mehanizatsiya stroitel'stva*. 2016; 1: 29–32. (in Russ.)

4. Salikhov R.F. Improving the methodology for predicting changes in the operational productivity of construction machines from operating time. *Mehanizatsiya stroitel'stva*. 2017;4: 46–50. (in Russ.)

5. Salikhov R.F., Popkov V.I. Methodology for calculating the performance change of a single-bucket hydraulic excavator in the process of operation. *Mehanizatsiya stroitel'stva*. 2018; Vol. 79. No. 3: 26–31. (in Russ.)

6. Salikhov R.F., Permyakov V.B., Filippov Y.O., Grusnev M.G. A study of dynamics of the operational performance of a single-bucket excavator, taking into account the operating time during construction of transport infrastructure of oil and gas facilities. *Journal of Physics: Conference Series* this link is disabled. 2021. 1901(1).0120981313

7. Maksimenko A.N., Makazarija D.Y., Kutuzov V.V., Kutuzova E.V., Zezulina E.V. Influence of the operating time from the beginning of operation of building and road machines on parameters of efficiency of their use. *Vestnik Belarusian – Russian University*. 2009; 2: 36–43. (in Russ.)
8. Grushetsky S.M., Evtyukov S.A., Repin S.V., Kuznecov A.A. Determination of technical and operating performance of road machines based on analysis of the scope of work. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021; 1: 38–52. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-38-52
9. Dubrovsky N., Veretennikova E., & Kameko O. Machine operating productivity as an indicator of the efficiency of its application. *Vestnik of Polotsk State University. Part D. Economic and Legal Sciences*. 2021; (5): 38–43. <https://doi.org/10.52928/2070-1632-2021-56-5-38-43>
10. Grushetsky S.M., Yevtyukov S.A., Repin S.V., Karro G.A. Productivity as a qualitative criterion for evaluating the effectiveness of all stages of the life cycle system of road vehicles. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2020; 4 (63): 36–42.
11. Mongush S.Ch., Choodu O.A., Yevtyukov S.A. Modeling of the processes of the influence of climatic factors and terrain on the productivity of ground transport and technological machines. *Polytechnical bulletin. Series: Engineering Studies*. 2019; 3 (47): 108–111. (in Russ.)
12. Maksimenko A.N., Kutuzov V.V., Sidorov A.N. The influence of the season and operating time since the beginning of operation on the productivity of construction and road machinery and the cost of mechanized work. *Gruzovik &*. 2010; 2: 16–21. (in Russ.)
13. Fahratov M.A., Kuzhin M.F., Ibragimov R.I. The Influence of Automated Control Systems of Lifting Mechanisms on the Performance of Construction Works. *Science prospects*. 2020; 1 (124): 62–65. (in Russ.)
14. Pavlov V.P. *Fundamentals of system engineering of multipurpose earthmoving machines: monograph*. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal Agency for Education, Krasnoyarsk State Technical University. un-T. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS; Krasnoyarsk: CPI KSTU, 2006: 332. (in Russ.)
15. Chmil V.P. *Gidropneumoprivod: monograph*. SPbGASU. St. Petersburg, 2010: 176. (in Russ.)
16. Minin V.V., Mirzoyan G.S. *Optimization of the drive parameters of small-sized loaders: monograph*. Krasnoyarsk: Ed. Krasnoyarsk State University, 1987:160. (in Russ.)
17. Salikhov R.F., Grusnev M.G. The influence of power plant parameters on the technical and economic indicators of single-bucket hydraulic excavators. *Construction and road machines*. 2010; 4: 47–49. (in Russ.)
18. Maksimenko A.N., Kutuzov V.V., Timofeev G.S., Vasiliev V.V. Accounting and evaluation of the efficiency of using each car of the park in construction. *Vestnik Belarusian – Russian University*. 2010; 4: 21–28. (in Russ.)
19. Maksimenko A.N. Evaluation of the efficiency of using machines in construction production. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*. 2008; 5 (20): 37–43. (in Russ.)
20. Grabovyy P.G., Zhikharev D.F. The productivity of an industrial housing construction enterprise as the main indicator of the potential intensity growth of the production and construction system Real Estate: Economics, Management. 2022; 2: 11–17. DOI: 10.22337/2073-8412-2022-2-11-17
21. Chechuyev V.E. Methodology for calculating the coefficient of conservation of efficiency of construction machines according to operation data. *Construction and road machines*. 2021; 5: 15–20. (in Russ.)
22. Repin S.V., Zazikin A.V., Rulis K.V., Maksimov S.E. Methodology for the formation of a fleet of transport and technological machines using leasing and credit. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2017; 4(63): 209–218. (in Russ.)
23. Yevtyukov S.A., Repin S.V., Grushetsky S.M., Karro G.A. Formation of a fleet of cars for the construction, reconstruction, repair and maintenance of highways, taking into account the stages of their life cycle. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2020; 3 (62): 62–68. (in Russ.)
24. Kulyashov I.D., Chechuyev V.E., Kravets K.O. The influence of types of operation on the efficiency and reliability of the fleet of construction machines. *Fundamental'nye osnovy mehaniki*. 2023; 11: 80–89. (in Russ.)
25. Dotsenko A.I. Complex monitoring of parameters of road vehicles and asphalt concrete mixture – the basis for improving the quality of road coverings. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2018; 2 (53): 89–93. (in Russ.)
26. Salikhov R.F., Berdnikov I.E. Method for calculating annual duration of maintenance and repairs of domestic and foreign excavators considering time in service. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(1): 26–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-26-37>. EDN: HZWSMV
27. Tarasov V.N., Kovalenko M.V. Mechanics of digging soils with a bucket of a hydraulic excavator. *Construction and road machines*. 2003; 8: 41–45. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Салихов Р.Ф. Формулирование направления и методологии исследования. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования, расчет параметров, определение аналитических и графических зависимостей. Формулирование результатов и выводов (80%).

Пермяков В.Б. Критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания. Анализ качества написания статьи. Формулировка результатов и выводов (20%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Salikhov R.F. Research area and methodology statement. Theme development process guiding. Research methodology and methods selection, parameters calculation, analytical and graphical dependencies determination. Results and conclusions statement (80%).

Permyakov V.B. Critical revision in terms of significant intellectual content. Quality of the article writing analysis. Results and conclusions statement (20%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Салихов Ринат Фокилевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9619-7789>, **SPIN-код:** 3196-9174, e-mail: salikhorinat@yandex.ru

Пермяков Владислав Борисович – д-р техн. наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, проф. кафедры «Эксплуатация нефте-

газовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-3957-237X>, **SPIN-код:** 9297-4909, e-mail: v.b_permyakov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rinat F. Salikhov – Cand. of Sci., Associate Professor, Maintenance and Operation of Transport and Technological Machines and Complexes in Construction Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5 Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9619-7789>, **SPIN cod:** 3196-9174, e-mail: salikhorinat@yandex.ru.

Vladislav B. Permyakov – Dr. of Sci., Honored Scientist of the Russian Federation, Professor of the Oil Gas and Construction Equipment Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5 Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-3957-237X>, **SPIN-code:** 9297-4909, e-mail: v.b_permyakov@mail.ru