

Минин В. В., канд. техн. наук, доц.,  
Носков М. В., д-р физ.-мат. наук, проф.  
Сибирский федеральный университет

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УНИВЕРСАЛЬНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ПОГРУЗЧИКА ПО КОМПЛЕКСНОМУ КРИТЕРИЮ

mininV@rambler.ru, mvnoskov@yandex.ru

*Предложен метод оценки технического уровня универсальных малогабаритных погрузчиков с бортовым поворотом на основе применения безразмерных критериев взаимосвязи его конструктивных и эксплуатационных параметров. Выявлена закономерность влияния точности оценки отдельного параметра на результирующую функцию.*

**Ключевые слова:** технический уровень, безразмерный критерий, малогабаритный погрузчик, точность расчета.

Универсальные малогабаритные погрузчики с бортовым поворотом (УМП) изобретены и внедрены в практику выполнения транспортно-технологических операций с середины XX в.

Прототип сегодняшнего УМП (произведен в 1957 г. компанией Merloe, США) появился под маркой Bobcat. Одним из достоинств машин данного типа является выполнение технологических операций в стесненных условиях и при ограничениях по давлению на опорную поверхность.

Наличие значительного количества сменных рабочих органов, высокая мобильность и маневренность, в сочетании с простотой управления в позволило эффективно механизировать ручной труд при выполнении малых объемов

работ на различных рассредоточенных объектах. По оценкам экспертов УМП составляют конкуренцию машинам средней и большой мощности работающим в однотипных условиях. В настоящий момент времени в мире производится более 100 тыс. машин в год, которые используются во многих отраслях: строительство и реконструкция зданий и сооружений, дорожное и коммунальное хозяйство, сельское хозяйство и т. д.

В России производство (например, рис. 1) и применение УМП активно началось в 1990-х гг., что связано с необходимостью модернизации промышленного сектора экономики и появлением рыночных отношений.



Рисунок 1. Универсальный малогабаритный погрузчик «Соболь», разработка Сибирского Федерального университета и Красноярского завода прицепной техники (г. Сосновоборск)

Недостатками, снижающими эффективность применения УМП являются: значительная величина отношения стоимости машины и комплекта сменного рабочего оборудования к заработной плате оператора, короткобазовое шасси, ограничивающее грузоподъемность; высокая динамическая нагруженность машины и плохая управляемость машины на твердых скользких поверхностях; жесткое, безрессорное крепление колес к раме; закопотированное пространство энергетической установки и гидропередач, снижающее теплообмен с окружающей средой; значительные затраты энергии и ресурсов по сроку службы шин при обеспечении бортового поворота; затрудненный и небезопасный вход в кабину оператора со стороны рабочего оборудования и др.

Фирмы-изготовители постоянно совершенствуют конструктивные схемы и отдельные подсистемы машин, но варианта, решающего все вышеперечисленные недостатки так и не найдено. Устраняются лишь отдельные недостатки УМП.

При проектировании машин данного типа требуется обеспечить точность и достоверность принятых значений основных параметров, которые в конечном счете предопределяют эффективное их применение.

Традиционная постановка задачи проектирования для малогабаритных и универсальных машин по теоретическим положениям и методикам, апробированным для машин среднего и тяжелого классов не всегда применима ввиду существенной нелинейной зависимости конструктивных параметров от главного параметра машины – эксплуатационной массы.

Значительное (около 70 наименований) количество дополнительного сменного рабочего оборудования циклического и непрерывного действия усложняет задачу определения приемлемого варианта сочетания конструктивных параметров. В связи с этим задача формирования критериев оценки технического уровня и эффективности для УМП требует обеспечения заданной точности расчетов на ранних стадиях проектирования, когда возможно менее затратное перепроектирование образца.

В случае определения эффективности работы УМП математическая постановка задачи не сводится к описанию в виде функциональных уравнений (обычно [1, 2], дифференциальных) и задачам линейного и нелинейного программирования. Математическая формулировка осложняется необходимостью учета детерминированных и стохастических рабочих процессов.

Для определения рациональных параметров УМП хорошо себя зарекомендовали статистиче-

ские методы [3] и метод размерностей. Анализ размерностей конструктивных и эксплуатационных параметров, входящих в целевую функцию (критерий) оценки степени совершенства (эффективности) позволяет определить структуру математической модели в виде зависимости между безразмерными комбинациями, составленными из этих параметров [2]. Целью данной работы является разработка метода оценки технического уровня УМП с учетом погрешности в определении значений конструктивных параметров входящих в безразмерные комплексы, принимаемые в качестве критерия.

Многообразие методик приводит к неоднозначной величине, рассчитываемого параметра. По результатам статистического анализа (решение задачи получено с применением программного продукта Data Fit версии 9.0 фирмы Oakdale Engineering, где расчет коэффициентов уравнений регрессии производился по методу наименьших квадратов) получены уравнения, представленные на рис. 2, 3. Вид уравнения регрессии принимался по значениям минимума стандартной и относительной ошибок аппроксимации, а надежность полученных результатов – по значению коэффициента детерминации  $R^2$ . Для исследования были приняты параметры моделей УМП, выпускаемых фирмами-производителями: J I Case Company; Clark Equip. Co. (Bobcat); Davis Welding & Mfg. Co.; John Deere; Erickson Corp.; Ford; Gehl Co.; Hydra – Mac Inc.; International Harvester; Northwestern Motor Co.; Owatonna Mfg. Co.; Prime Mover Co.; Sperry New Holland; TCI Inc.; Thomas Equip. Ltd. Анализ зависимостей показывает, что для заданного значения эксплуатационной массы (силы тяжести)  $G$  грузоподъемная сила  $Z$  и установочная мощность двигателя  $N$  имеют как минимум 30 % диапазон разброса значений.

Количественную оценку степени совершенства конструкции УМП на данной стадии проектирования возможно проводить по критерию стоимости потерь мощности  $\Pi_{CN}$  [2]:

$$\Pi_{CN} = \frac{\{CP + C_3(1 - P)\} \cdot \{1 - \bar{\eta}(1 - k_{ом})\}}{N\bar{\eta}(1 - k_{ом})}, \text{руб./кВт},$$

где  $C$  – стоимость УМП и комплекта сменного рабочего оборудования, руб.,  $C_3$  – стоимость эксплуатации машины, руб.;  $P$  – вероятность безотказной работы машины;  $N$  – установочная мощность двигателя, кВт,  $\bar{\eta}$  – математическое ожидание КПД на режиме работы;  $k_{ом}$  – коэффициент отбора мощности на вспомогательное оборудование.

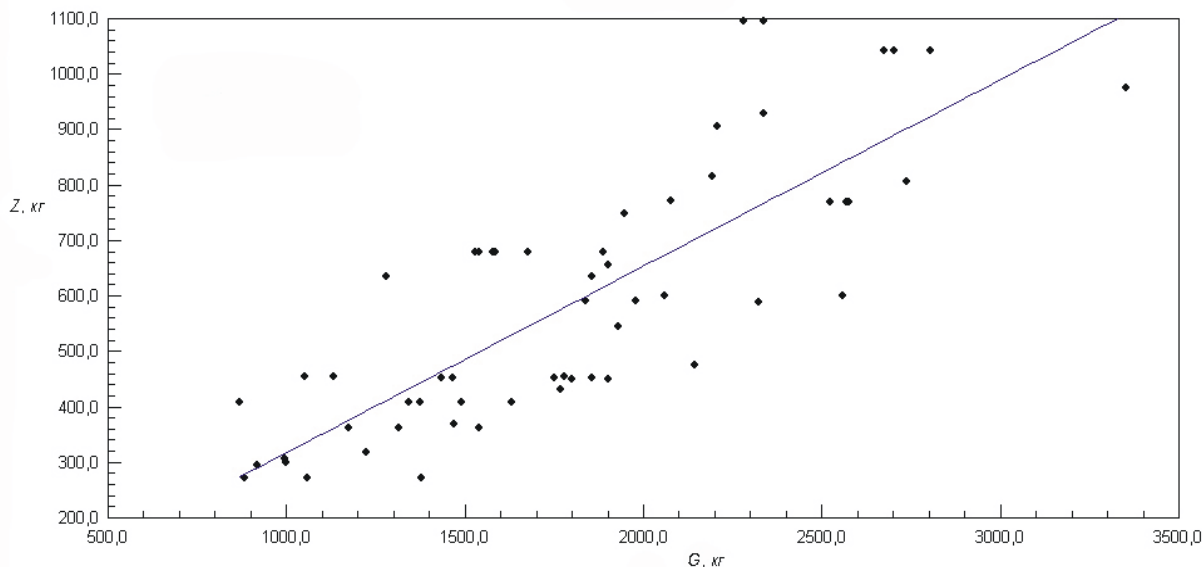


Рисунок 2. Зависимость грузоподъемной силы  $Z$  от эксплуатационной массы (силы тяжести)  $G$  машины:  
 $Z = 0,336 \cdot G - 18391$ ;  $R^2 = 0,6619$

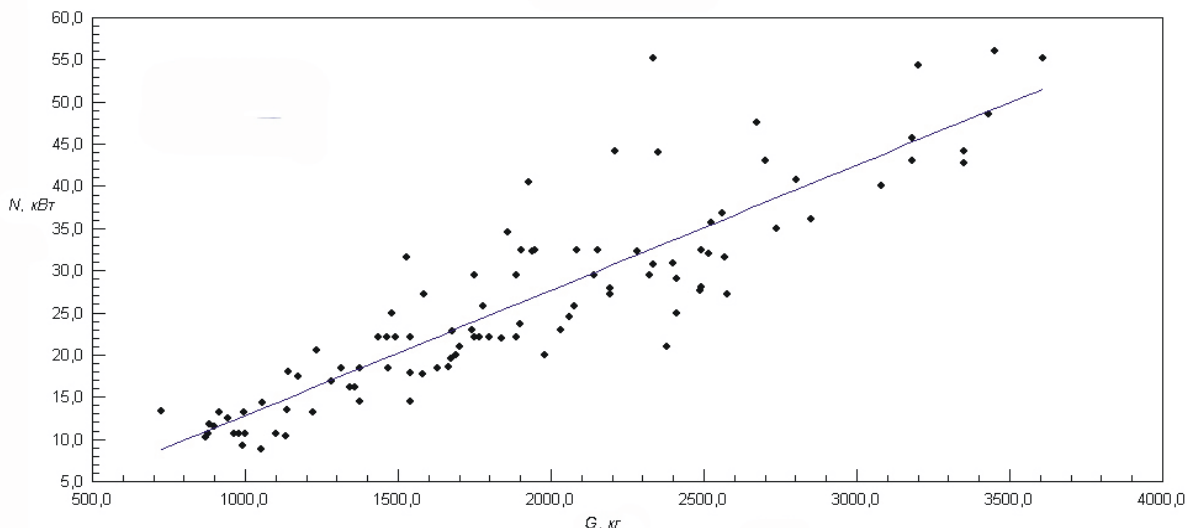


Рисунок 3. Зависимость установочной мощности двигателя  $N$  от эксплуатационной массы (силы тяжести)  $G$  машины:  $N = 0,015 \cdot G + 2,02$ ;  $R^2 = 0,7909$

Универсальная машина со сменными рабочими органами выполняет различные технологические операции (разнородные по количественному показателю). Объемы этих работ могут выражаться различными единицами измерения. Принимая во внимание, что производительность универсальной машины на объекте с разнородными работами – это производимое в единицу времени количество работы (продукции), исчисляемое в единицах измерения объема работы по конечному (готовому) сооружению (строительному объекту). Формула для расчета имеет вид [3]

$$Q_j = 1 / \sum_{j=1}^k \frac{\delta_j}{Q_{ij}}$$

где  $\delta_j = V_j / V$  – доля отдельного  $j$ -го объема работ в общем объеме работ на объекте;  $Q_{ij}$  – производительность  $i$ -го рабочего оборудования при выполнении  $j$ -го вида работы, включая время замены данного оборудования на другое.

Эксплуатационная масса (сила тяжести) агрегатированного сменным рабочим оборудованием УМП определяется по формуле:

$$G_T = G_6 + G_{po}$$

где  $G_6$  – масса (сила тяжести) базовой машины без рабочего органа,  $G_{po}$  – масса (сила тяжести) сменного рабочего оборудования.

Стоимость УМП со сменным рабочим органом определяют в виде суммы стоимостей ба-

зовой машины  $C_6$  и сменного рабочего органа (оборудования)  $C_{po}$ :

$$C = C_6 + C_{po}.$$

В данной работе, ввиду сложности математического описания разнородных рабочих процессов, принята методика выявления структуры модели на основе теории размерностей.

В общей форме математическая модель взаимосвязи параметров с учетом технико-экономического подобия и эффективности на основе критерия стоимости потерь мощности ( $\pi_{CN}$ ) записывается в виде:

$$\Xi = \Xi(\pi_{CN}, G, C, Q, A),$$

где  $\pi_{CN}$  – стоимость потерь мощности, руб./кВт;  $G$  – эксплуатационная масса (сила тяжести) машины, кг;  $C$  – стоимость машины или затраты на ее эксплуатацию, руб.;  $Q$  – секундная теоретическая производительность, кгс/с;  $A$  – удельная энергоёмкость рабочего процесса, Н/м<sup>2</sup>.

Руководствуясь теоремами теории подобия и размерности по существующей методике разработан безразмерный критерий:

$$\pi_{CN} = \frac{AG^2}{Q^3} \sqrt{\frac{C}{\pi_{CN} \cdot Q}}.$$

$$\Delta_{\frac{AG^2}{Q^3} \sqrt{\frac{C}{\pi_{CN} Q}}} = \sqrt{\left( \frac{G^2 \cdot \sqrt{\frac{C}{Q \pi_{CN}}}}{Q^3} \right)^2 \cdot \Delta_A^2 + \left( \frac{2AG \cdot \sqrt{\frac{C}{Q \pi_{CN}}}}{Q^3} \right)^2 \cdot \Delta_G^2 \cdot \left( -\frac{3AG^2 \cdot \sqrt{\frac{C}{Q \pi_{CN}}}}{Q^4} - \frac{ACG^2}{2Q^5 \pi_{CN} \cdot \sqrt{\frac{C}{Q \pi_{CN}}}} \right)^2 \cdot \Delta_Q^2 + \left( \frac{AG^2}{2Q^4 \pi_{CN} \cdot \sqrt{\frac{C}{Q \pi_{CN}}}} \right)^2 \cdot \Delta_C^2 + \left( \frac{ACG^2}{Q^4 \pi_{CN} \cdot \sqrt{\frac{C}{Q \pi_{CN}}}} \right)^2 \cdot \Delta_{\pi_{CN}}^2}.$$

Установлено, что критерий  $\pi_{CN}$  на порядок менее чувствителен к погрешностям, входящих в него конструктивных и технологических параметров (значениях погрешностей в определении производительности машины  $\Delta_Q$  и удельной энергоёмкости рабочего процесса  $\Delta_A$ ).

Рассматриваемый вопрос оценки эффективности и технического уровня с учетом влияния погрешностей параметров решен путем формирования критерия в безразмерном виде, отражающего физические процессы работы УМП, где погрешность определяется самой еди-

Направления повышения эффективности УМП определяются при условиях стремления критериев к своим предельным значениям с учетом ограничений, определяемых для конкретных условий эксплуатации:

$$\pi_{CN} \rightarrow \min \text{ при } \begin{cases} A - \text{const} \\ G \rightarrow \min \\ Q \rightarrow \max \\ \pi_{CN} \rightarrow \min \\ C \rightarrow \min \end{cases}$$

Данный критерий оценки технического уровня и эффективности отражает актуальную проблему ресурсо- и энергосберегающих технологий при проектировании и эксплуатации УМП.

Для расчета абсолютной погрешности безразмерной критериальной функции используем следующую формулу [4]:

$$\Delta_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f(\pi)}{\partial x_i} \right)^2 \Delta_{x_i}^2},$$

где  $f(\pi)$  – функция в виде безразмерного комплекса;  $x_i$  – значения  $i$ -го конструктивного параметра;  $\Delta_{x_i}$  – погрешность вычисления значений  $i$ -го параметра.

Тогда

ницей измерения, а погрешность уравнения следует принимать с учетом результатов исследований, представленных на рис. 4. Установлено, что критерий эффективности и оценки технического уровня является устойчивым по отношению к погрешностям исходных данных, а также способностью нивелирования этих погрешностей и определяет направления совершенствования конструкций с учетом ресурсо- и энергосберегающих технологий при проектировании и в эксплуатации.

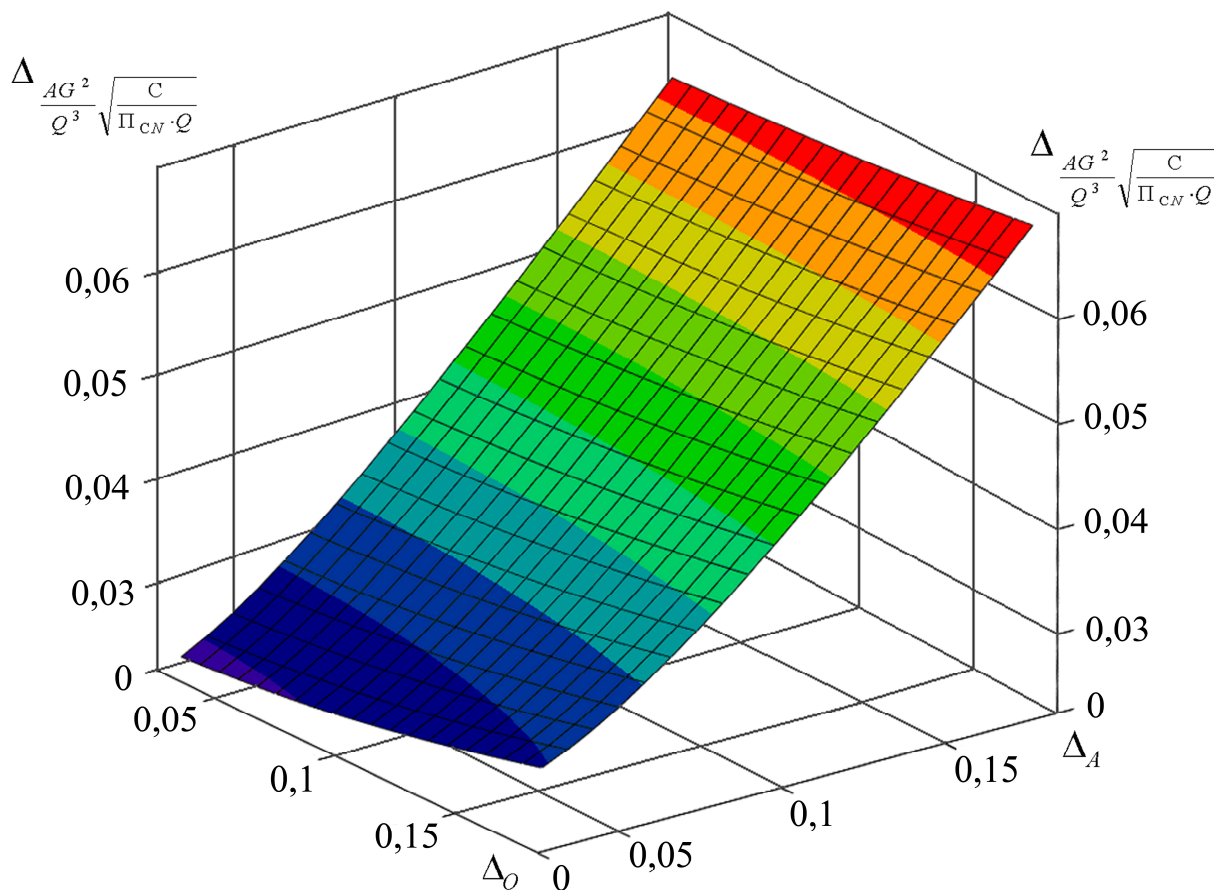


Рисунок 4. Зависимость абсолютной погрешности безразмерного критерия  $\pi_{CN}$  от погрешностей значений производительности  $Q$  и удельной энергоёмкости рабочего процесса  $A$

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минин, В.В. Оптимизация параметров привода малогабаритных погрузчиков: монография / В.В. Минин, Г.С. Мирзоян. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1987. – 160 с.
2. Минин, В.В. Оптимизация параметров гидропривода малогабаритных погрузчиков / В.В. Минин, В.П. Павлов // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 7. – С. 34–37.
3. Попов, В.Г. Оценка эффективности подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин : учеб. пособие / В.Г. Попов. – Череповец: Изд. ГОУ ВПО ЧГУ, 2005. – 184 с.
4. Зайдель, А.Н. Погрешности измерений физических величин / А.Н. Зайдель. Л.: Наука, 1985. – 112 с.