Крахотин А.И.
*Московский автомобильно-дорожный институт
Москва, Россия*

doi: 10.18411/lj2016-6-2-07

**Определение геометрических размеров погрузчиков
и связей подобия с главным техническим параметром
и параметрическое формирование чертежа общего вида**

Аннотация. Проектирование начинается с изучения технических характеристик и конструкций уже имеющихся образцов. Эта информация бывает неполной и ее приходится собирать в различных источниках (журналы, выставочные презентации и т.д.). В данной статье рассматривается работа фронтальных погрузчиков в различных условиях эксплуатации. При проектировании машины важно определить геометрические размеры. Они должны быть связаны с техническими параметрами. В качестве главного технического параметра рассматривается грузоподъемность.

Формировать зависимости можно с помощью теории подобия. Оптимизировать конструкцию проектируемого изделия можно при анализе этих зависимостей и использовать эти данные на стадии технического предложения и эскизного проекта.

Ключевые слова: Ковшовый погрузчик; масса погрузчика; теория подобия; геометрические параметры, грузоподъемность, параметризация.

Aleksandr I. Krahotin

The definition of geometric dimensions of wheel loaders and relationships with the likes of Chief Technical parameter.

Abstract. Design begins with a study of the technical characteristics and design of the existing samples. This information is incomplete, and it should be collected from various sources (magazines, exhibitions and presentations, etc.) This article discusses the work of front-end loaders in a variety of operating conditions. In the design of the machine it is important to determine the geometric dimensions. They should be linked to technical parameters. As the main technical parameters considered capacity.

Forming relationships can be with the help of the theory of similarity. Optimize the design of the product can be designed in the analysis of these relationships and use this data at the stage of technical proposal and conceptual design.

Keywords. Dump trucks; Loader weight; similarity theory; geometric parameters, load.

Введение

Эффективность дорожного строительства зависит от масштаба применения инноваций в технике и технологиях. Развитие перспективных направлений в машиностроении приводит к повышению эффективности строительной техники. К современным тенденциям повышения эффективности техники можно отнести создание интеллектуальных компьютерных систем управления, оптимизация параметров, повышение экологической безопасности, соблюдение техники безопасности и условий труда обслуживающего персонала, применение машин в заданных условиях эксплуатации, гибридизация, создание многоцелевой техники, обеспечение регламентированного сервиса.

Применение результатов развития нанотехнологий и являются резервом повышения эффективности строительной техники.

Одноковшовые фронтальные погрузчики широко используются на объектах дорожного, индустриального и жилищного строительства.

Погрузчик является средством для интенсификации погрузочно-разгрузочных работ в широком диапазоне физико-механических свойств разрабатываемого материала. Современные погрузчики имеют набор легкоъемного навесного оборудования (ковши различного типа, вилы, захваты, снегоочистители, грузоподъемные устройства, гидромолоты и др.)

Анализ опыта проектирования и исследования параметров погрузчиков показал отсутствие обоснования и рекомендаций по определению геометрических параметров.

В настоящее время проектирование любого изделия невозможно представить без использования систем автоматизированного проектирования. Повышение эффективности работы конструктора при проектировании является перспективным направлением разработки систем САПР.

Современной тенденцией развития промышленности является сокращение сроков разработки и освоения выпуска новых образцов техники.

На современном этапе развития техники компьютерное моделирование и графика являются одним из главных методов создания эффективных образцов дорожно-строительной техники, который позволяет существенно уменьшить трудоемкость проектирования машины.

Идея параметрического моделирования появилась ещё на ранних этапах развития САПР, но долгое время не могла быть осуществлена по причине недостаточной компьютерной производительности.

Геометрические модели используются на протяжении практически всего жизненного цикла изделия. Одной из наиболее мощных технологий разработки геометрических моделей в машиностроительных САПР является параметрическое моделирование, подразумевающее использование параметрических геометрических моделей (ПГМ), управляемых параметрами.

Применение ПГМ позволяет значительно снизить трудоемкость

разработки ГМ благодаря: автоматической генерации различных вариантов конструкции по заданным параметрам; широкому повторному использованию разработанных моделей и организации библиотек типовых параметрических конструктивных элементов; автоматическому решению большого числа геометрических задач, возникающих в процессе проектирования. Наибольший эффект использование ПГМ дает в типовом конструировании, эскизном черчении, моделировании кинематики механизмов.

Определение геометрического образа, создаваемого на этапе технического предложения и эскизного проекта, является базой для эффективного решения и дальнейшего проектирования. На этом этапе может быть представлена общая предполагаемая схема изделия. Размеры проектируемого объекта требуют обоснования и должны быть связаны с техническими параметрами этого объекта.

В качестве главных технических параметров могут рассматриваться масса m , энергонасыщенность N/m , мощность двигателя N , тяговое усилие, развиваемое двигателем T , вместимость ковша q .

Формировать зависимости можно с помощью теории подобия. Теория подобия соединяет в себе моделирование и эксперимент. С ее помощью можно изучить объект и отразить полученный результат на другие объекты.

Определение параметров подобных процессов основывается на установлении связей параметров подобных процессов. Уравнения, описывающие процессы, будут одинаковы, следовательно, критерии подобия тоже будут одинаковыми. Таким образом, параметры проектируемого изделия можно определить через его главный параметр (всегда известен) и параметр эталонной машины (тоже известен).

Возможность функционирования машины в определенных рабочих условиях является первоочередной задачей при проектировании нового образца техники. Рассмотрение различных условий эксплуатации позволяет установить рациональные геометрические размеры проектируемого изделия.

Геометрические размеры должны быть обоснованы и связаны с главным техническим параметром. Главным техническим параметром одноковшовых погрузчиков по ГОСТ Р 51601–2000 является грузоподъемность.

Теория подобия является инструментом, с помощью которого можно сформировать зависимости между грузоподъемностью и линейными размерами проектируемой машины. С ее помощью можно экспериментально изучить объект и отразить полученный результат на другие объекты. Метод, позволяющий установить связи подобия, обоснован и изложен в учебном пособии [1]. Данный метод позволяет установить оптимальные параметры для конкретной машины и заданных условий эксплуатации. Решение получают при рассмотрении объекта, взятого из общей группы подобных объектов.

Такой метод эффективен для определения параметров машины на начальной стадии проектирования.

Теория подобия основывается на трех теоремах подобия. В учебниках [2], [4] показано применение принципа подобия.

Теория подобия является аналогией аналитического расчета, т.к. задаются начальные условия, параметры исследуемого объекта.

Уравнения, описывающие процессы работы, будут одинаковы, следовательно, критерии подобия будут равны. Таким образом, параметры проектируемого изделия можно определить через его главный параметр, который всегда известен как и параметр эталонной машины. Критерий подобия это - безразмерное соотношение величин физических эффектов между проектируемым и эталонным изделиями.

В работах В.П. Горячкина, В.Л. Кирпичева, В.А. Веникова, Г.Н.Кузнецова, Г.И. Покровского показано применение принципа подобия в различных областях науки: машиностроение, энергетика, горное дело, строительная механика и т.д.

В основе создания и развития теории параметризации лежат труды отечественных ученых Н.Ф. Четверухина, Н.Н. Рыжова, И.И. Котова, В.С.

Полозова и их учеников. Из иностранных специалистов наибольший вклад в развитие теории параметризации внесли J. Owen, B.N. Freeman-Benson, B.A Myers и многие другие.

Параметрическое моделирование существенно отличается от обычного двумерного черчения или трёхмерного моделирования. Конструктор в случае параметрического проектирования создаёт математическую модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации детали, взаимные перемещения деталей в сборке и т. п.

Работа с вариационной параметрической моделью заключается в создании конструктором эскиза изделия с последующим определением параметрических связей, зависимостей и ограничений. Преимущество данного метода заключается в простоте изменения величины параметров и геометрии проектируемого изделия.

Основная идея геометрической параметризации заключается в том, что параметры составных частей рассчитываются в зависимости от параметров с которыми установлена параметрическая связь.

Для решения данной задачи на производстве существуют различные прикладные пакеты САПР, которые реализуют метод параметрического моделирования: AutoCAD, Компас-3D, SolidWorks, T-FLEXCAD 2D и другие[3]

Оптимальные технико-эксплуатационные и геометрические параметры являются базой для составления технического предложения и выполнения эскизного проекта.

Определение связей подобия

Связи между параметрами дорожно-строительных машин можно установить на основании критериев подобия при установившемся процессе взаимодействия машины с грунтом.

Рассмотрим уравнение движения машины

$$T_d = F_{дв} + F_r + F_k,$$

где T_d – тяговое усилие, развиваемое двигателем, Н;

$F_{\text{дв}}$ – сопротивление движению машины, Н;

F_{Γ} – сопротивление перемещению грунта, отделенного от массива, Н;

$F_{\text{к}}$ – сопротивление копанию, Н.

$$T_{\text{д}} = \varphi_{\text{сц}} \cdot m \cdot g,$$

где $\varphi_{\text{сц}}$ – коэффициент сцепления движителя;

m – масса машины, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

$$F_{\text{дв}} = f_{\text{дв}} \cdot m \cdot g,$$

где $f_{\text{дв}}$ – коэффициент сопротивления движению машины.

$$F_{\Gamma} = q \cdot \gamma_{\Gamma} \cdot f_{\Gamma},$$

где q – вместимость ковша, м^3 ;

γ_{Γ} – объемный вес грунта, Н/м^3 ;

f_{Γ} – коэффициент сопротивления перемещению грунта.

$$F_{\text{к}} = k_{\text{уд.к.}} \cdot b \cdot h,$$

где $k_{\text{уд.к.}}$ – удельное сопротивление грунта копанию, Н/м^2 ;

b – ширина рабочего органа (ширина ковша), м;

h – высота резания грунта, м.

$$q \approx l^3,$$

где l – обобщенный линейный размер, м.

$$N = T_{\text{д}} \cdot \vartheta_{\text{тр}},$$

где $\vartheta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии.

Определение критериев подобия

Получаем критерии подобия путем приведения к безразмерным величинам, деля все члены уравнения на один из них

$$X_1 = \frac{\varphi_{\text{сц}} \cdot m \cdot g}{G_{\text{гр}}}, \quad X_2 = \frac{f_{\text{дв}} \cdot m \cdot g}{G_{\text{гр}}}, \quad X_3 = \frac{q \cdot \gamma_{\Gamma} \cdot f_{\Gamma}}{G_{\text{гр}}}$$

$$X_4 = \frac{k_{\text{уд.к.}} \cdot b \cdot h}{G_{\text{гр}}}, \quad X_5 = \frac{l^3}{G_{\text{гр}}}, \quad X_6 = \frac{T_{\text{д}} \cdot \vartheta_{\text{тр}}}{G_{\text{гр}}}.$$

Критерии подобия являются безразмерными величинами, которые представляют собой отношения физических эффектов, совершаемых машиной, к тяговому усилию, развиваемому двигателем. Критерии подобия для подобных машин являются равными. Из этого равенства получают связи между масштабными величинами, входящими в критерий подобия – индикаторы подобия.

Индикаторы подобия у подобных машин равны единице.

$$\frac{k_{\varphi_{\text{сц}}} \cdot k_m \cdot k_g}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1, \quad \frac{k_{f_{\text{дв}}} \cdot k_m \cdot k_g}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1, \quad \frac{k_q \cdot k_{\gamma_{\text{г}}} \cdot k_{f_{\text{г}}}}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1,$$

$$\frac{k_{k_{\text{уд.к.}}} \cdot k_b \cdot k_h}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1, \quad \frac{k_l^3}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1, \quad \frac{k_{T_{\text{д}}} \cdot k_{\vartheta_{\text{тр}}}}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1.$$

Эксплуатация машин происходит в одинаковых условиях, поэтому масштабы величин равны единице $k_{\varphi_{\text{сц}}} = 1, k_g = 1, k_{k_{\text{уд.к.}}} = 1, k_{\gamma_{\text{г}}} = 1,$

$$k_{f_{\text{г}}} = 1, k_{f_{\text{дв}}} = 1, k_{\vartheta_{\text{тр}}} = 1.$$

Индикаторы приобретают следующий вид

$$\frac{k_m}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1, \frac{k_m}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1, \frac{k_q}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1, \frac{k_b \cdot k_h}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1, \frac{k_l^3}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1, \frac{k_{T_{\text{д}}}}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1.$$

Рассмотрев индикаторы подобия, можно увидеть противоречие

$$\frac{k_{k_{\text{уд.к.}}} \cdot k_b \cdot k_h}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1 \rightarrow \frac{k_{k_{\text{уд.к.}}} \cdot k_l^2}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1,$$

$$\frac{k_q \cdot k_{\gamma_{\text{г}}} \cdot k_{f_{\text{г}}}}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1 \rightarrow \frac{k_{\gamma_{\text{г}}} \cdot k_l^3}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1.$$

Индикатор $\frac{K_l^2}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1$ – отношение масштабов сил структурной прочности

грунта к масштабу тягового усилия двигателя.

Индикатор $\frac{K_l^3}{k_{G_{\text{гр}}}} = 1$ – отношение масштабов сил гравитационной природы

к масштабу тягового усилия двигателя.

Для подобных машин индикаторы подобия двух критериев подобия равны

$$\frac{k_{k_{\text{уд.к.}}} \cdot k_l^2}{k_{G_{\text{гр}}}} = \frac{k_{\gamma_{\text{г}}} \cdot k_l^3}{k_{G_{\text{гр}}}}.$$

Это противоречие снимается практическим путем в результате соблюдения соответствующих условий эксплуатации.

Для подобных машин $k_{G_{\text{гр}}} = k_{G_{\text{гр}}}$, $k_{\gamma_{\text{г}}} = 1$. Следовательно,

$$k_{k_{\text{уд.к.}}} \cdot K_l^2 = K_l^3.$$

Для соблюдения этого равенства существуют два пути:

при использовании легких машин в тех же условиях эксплуатации, что и тяжелых, нагрузки, которые действуют на машину, уменьшаются за счет уменьшения толщины срезаемого грунта.

$$k_{k_{\text{уд.к.тяж.}}} = k_{k_{\text{уд.к.лег.}}}$$

$$k_{k_{\text{уд.к.}}} \cdot k_b \cdot k_h = K_l^3.$$

При $k_{k_{\text{уд.к.}}} = 1$, $k_b = k_l$

$$k_h = \frac{K_l^3}{k_l} = K_l^2,$$

$$\frac{h_{\text{тяж}}}{h_{\text{лег}}} = K_l^2,$$

где $h_{\text{тяж}}$ — толщина грунта ,срезаемого тяжелой машиной, м;

$h_{\text{лег}}$ — толщина грунта ,срезаемого легкой машиной, м.

Рассмотренные условия соблюдаются при использовании соответствующих режимов работы. Это обеспечивает соблюдение условия подобия.

при сохранении геометрического подобия

$$k_b = k_h = k_l, \text{ поэтому } k_{k_{\text{уд.к.}}} = \frac{k_l^3}{k_l^2} = k_l,$$

$$k_{k_{уд.к.}} = \frac{k_{k_{уд.к.тяж.}}}{k_{k_{уд.к.лег.}}} = k_l,$$

$$\frac{k_{k_{уд.к.тяж.}}}{k_l} = k_{k_{уд.к.лег.}},$$

где $k_{уд.к.тяж.}$ – удельное сопротивление грунта копанию, для тяжелых машин Н/м^2 ; $k_{уд.к.лег.}$ – удельное сопротивление грунта копанию, для легких машин Н/м^2 ;

k_l – масштаб линейного размера рабочего органа.

Легкая машина с меньшим рабочим органом будет использоваться для работы с менее прочными грунтами.

Из равенства критериев подобия видно, что между техническими параметрами машины $G_{гр}$, N , T , m , q , l существуют связи подобия. Эти зависимости получают в результате анализа индикаторов подобия.

Зависимости подобия между основными параметрами приведены в табл. 1. Коэффициенты пропорциональности рассчитываются по параметрам существующей эффективной машины, которую принимают за эталон.

Таблица 1

Коэффициенты пропорциональности для подобных фронтальных погрузчиков

Коэффициент	Расчетная зависимость
k_1	T_0/G_0
k_2	N_0/G_0
k_3	m_0/G_0
k_4	q_0/G_0
k_5	$l_0/G_0^{1/3}$

Расчет коэффициентов пропорциональности может быть представлен в виде табл. 2.

Таблица 2

Формулы для определения основных технических параметров погрузчиков

Рассчитываемый параметр	Определяющий параметр			
	Грузоподъемность $G_{гр}$			
Тяговое усилие T	$k_1 * G_{гр}$			
Мощность N		$k_2 * G_{гр}$		
Масса m			$k_3 * G_{гр}$	
Вместимость ковша q				$k_4 * G_{гр}$
Линейный размер l				$k_5 * G_{гр}^{1/3}$

Статистические данные подтверждают наличие связей подобия. Подобные соотношения установлены для фронтальных ковшовых погрузчиков (рис. 1 а-ф). Объем выборки составляют 94 машины (Catepillar, Komatsu, Hitachi, ЧТЗ-Уралтрак, DOOSAN, XCMG, ChangLin, Chenggong, Foton, Fukai, SDLG LinGong, Shandong, XiaGong, Yigong). Основной трудностью при сборе информации по геометрическим размерам и другим техническим параметрам является ее большая рассеянность в различных источниках (сайты, журналы, рекламные брошюры и т.д.). Некоторые источники дают исчерпывающие данные [6] по техническим характеристикам выпускаемых изделий.

Оценивая статистическую составляющую зависимостей можно сделать вывод, что основная масса машин проектируется как универсальные машины (рис. 1а). Однако из графика видно, что отдельные машины создаются для специфических условий эксплуатации. Машины при одинаковой грузоподъемности имеют различную величину мощности двигателя. Большая мощность двигателя подразумевает работу на больших скоростях и на дальние перемещения грунта, меньшая мощность двигателя – работа на меньших скоростях в более стесненных условиях.

Выводы:

1. Из рассмотренных положений следует, что между основными параметрами погрузчикам, N , T , q , l существуют связи подобия. Эти связи получены на основе анализа индикаторов подобия. Они приведены в табл.1 и табл.2.

2. Обработка статистических данных подтверждает приведенные выше расчеты. На графиках зависимостей (рис.1 а-ф) представлены зависимости мощности, объема ковша, массы, линейных размеров машины от грузоподъемности машины. Размерные характеристики машины взяты в соответствии с ГОСТ [5].

Графики зависимостей

3. Однако не все линейные размеры подчиняются полученным зависимостям (рис. 1 х-ш).

4. Полученный экспериментальный материал является обосновывающим достоверность теоретических исследований. Линейные размеры погрузчика, рассчитанные по формулам из графиков (рис.1 а-ф), будут оптимальными для заданных условий эксплуатации. Зависимости являются основанием для формирования программы автоматизированного компьютерного проектирования чертежа общего вида погрузчика на этапе эскизного проектирования. Чертеж и величины линейных размеров являются исходной базой для выполнения силового и тягового расчета, а также расчета на прочность, устойчивость в рамках технического проекта.

Литература:

1. Баловнев, В.И. Оптимизация и выбор инновационных систем и процессов транспортно-технологических машин / В.И.Баловнев.- М.:Техполиграфцентр, 2014. – 392 с.
2. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования/ В.А.Веников. –М.: Высшая школа, 1984. – 439с.
3. Полещук Н.Н. AutoCAD: разработка приложений, настройка и адаптация. - .СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 992 с.
4. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике /Л.И. Седов. – Изд. 9-е, перераб.–М.: Наука, 1981. – 448с.
5. ГОСТ 27721-88 (ИСО 7131-84) Машины землеройные. Погрузчики. Термины, определения и техническая характеристика для коммерческой документации. – М.; Государственный комитет СССР по стандартам, 1989.-30 с.
6. Caterpillar Справочник. Техничко-эксплуатационные характеристики машин Caterpillar: Справочник - Изд. 37-е.- США, Иллинойс, Пеория: Изд. CaterpillarInc, 2007. – 1319 с.

References

1. Balovnev V.I. Optimizacijaivyborinnovacionnyhsistemiprocessovtransportno-tehnologicheskikh mashin/ V.I.Balovnev, Moscow. Tekhpoligrafcentr, 2014, 439 p.
2. Venikov V.A. Teorijapodobija I modelirovanija(Theory of similarity and modeling), Moscow, Visshajashkola, 1984, 439 p.
3. Poleshhuk N.N. AutoCAD: razrabotkaprilozhenij, nastrojkaiaadaptacija,SPb.: BHV-Peterburg. 2006, 992 p.
4. Sedov L.I. Metodypodobijairazmernosti v mehanike, Moscow, Nauka, 1981, 448 p.
5. Mashinyzemleroinye. Pogruzchiki. Terminy, opredelenija I technicheskajacharakteristikadljakommercheskoidokumentachii, GOST 22721-88 (ISO 7131-84) (Cars digging. Loaders. Terms, definitions and technical characteristics for commercial documentation GOST 22721-88 (ISO 7131-84) ,Moscow, Standarty, 1989, 30 p.
6. Caterpillar Spravochnik. Tehniko-jekspluatacionnyeharakteristikimashin Caterpillar, USA, 2007, 1319 p.