

#### 4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья  
УДК 004.94+621.431+621.8-1/-9  
DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2023\_1\_80

### Определение параметров контактного взаимодействия деталей механизма с использованием методов идентификации модели

Аркадий Васильевич Химченко<sup>1✉</sup>, Владимир Иванович Оробинский<sup>2</sup>,  
Николай Иванович Мищенко<sup>3</sup>, Александр Игоревич Петров<sup>4</sup>, Сергей Евгеньевич Волков<sup>5</sup>

<sup>1, 2</sup>Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия

<sup>3, 4, 5</sup>Донецкий национальный технический университет, Автомобильно-дорожный институт,

Горловка, Россия

<sup>1</sup>himch.arkady@yandex.ru✉

**Аннотация.** Создание современных не только экономичных, но и экологических источников энергии является актуальной задачей. На наземном транспорте и в сельском хозяйстве такими источниками в ближайшей перспективе будут оставаться двигатели внутреннего сгорания. При разработке сложных узлов и агрегатов, используемых в наземных транспортно-технологических средствах и других средствах механизации и технических системах, для адекватного моделирования отдельных подсистем на этапе проектирования необходимо иметь оценочные значения параметров модели с высокой степенью точности. Оценка параметров может быть выполнена с использованием методологии идентификации моделей и параметрической оптимизации. При имитационном моделировании работы замка фиксации штока поршня бесшатунного двигателя появилась сложность в определении параметров контактного взаимодействия деталей. Представлены результаты определения этих параметров, а также проверка возможности использования методов идентификации модели для решения подобных задач и оценки точности полученных результатов. Был подготовлен и проведен эксперимент с деталями аналогичного размера и массы. С помощью видеофиксации измерялась величина отскока свободно падающего шарика от стальной пластины. В среде Matlab Simulink была создана имитационная модель с блоками контактного взаимодействия. По результатам серии экспериментов по идентификации модели на основе параметрической оптимизации были получены значения коэффициента упругости и коэффициента демпфирования при соударении двух стальных деталей с небольшой кинетической энергией. Статистическая обработка результатов показала, что значения коэффициентов имеют доверительный интервал с погрешностью на его границах, не превышающей 5%. Такую ошибку идентификации с учетом точности эксперимента можно считать хорошим результатом. При этом точность моделирования может быть повышена за счет использования регрессионных моделей. Показано, что полученные статистически значимые результаты расширяют возможности применения технологии модельно ориентированного проектирования для разработки источников энергии для наземных транспортных средств и средств механизации сельского хозяйства.

**Ключевые слова:** модельно ориентированное проектирование, имитационное моделирование, контактное взаимодействие, идентификация модели, ошибка идентификации

**Для цитирования:** Химченко А.В., Оробинский В.И., Мищенко Н.И., Петров А.И., Волков С.Е. Определение параметров контактного взаимодействия деталей механизма с использованием методов идентификации модели // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 1(76). С. 80–89. [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2023\\_1\\_80-89](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_1_80-89).

#### 4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

### Determination of the parameters of contact interaction of machinery parts using model identification methods

Arkady V. Khimchenko<sup>1✉</sup>, Vladimir I. Orobinsky<sup>2</sup>, Nikolay I. Mishchenko<sup>3</sup>,  
Aleksandr I. Petrov<sup>4</sup>, Sergey E. Volkov<sup>5</sup>

<sup>1, 2</sup>Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

<sup>3, 4, 5</sup>Donetsk National Technical University, Automobile and Highway Institute, Gorlovka, Russia

<sup>1</sup>himch.arkady@yandex.ru✉

**Abstract.** The creation of modern, not only economical, but also environmentally friendly energy sources is an urgent task. In above-ground transport and agriculture, internal combustion engines will remain such sources in the coming years. When developing complicated components and aggregates used in ground transport and handling equipment and other means of mechanization and engineering systems, for adequate modeling of individual subsystems at the design stage, it is necessary to obtain estimated values of model parameters with a high degree of accuracy. Parameter estimation can be performed using the methodology of model identification and parametric optimization. When simulating the operation of the piston rod locking keylock of a conrod free (piston) engine, it became difficult to determine the parameters of the contact interaction of parts. The results of determining these parameters are presented, as well as checking the possibility of using model identification methods to solve such problems and evaluating the accuracy of the results obtained. An experiment was prepared and conducted with parts of similar size and mass. With the help of video recording, the magnitude of the rebound of a free-falling ball from a steel plate was measured. A simulation model with contact interaction blocks was created in the Matlab Simulink environment. According to the results of a series of experiments based on parametric optimization, the values of the elasticity coefficient and the damping coefficient were obtained when two steel parts collided with a small kinetic energy. Statistical processing of the results showed that the values of the coefficients have a confidence interval with an error at its boundaries not exceeding 5%. Such an identification error, taking into account the accuracy of the experiment, could be considered as a good result. At the same time, the accuracy of modeling can be improved by using regression models. It is shown that the statistically significant results obtained promote opportunities of using model-based design technology for the development of energy sources for above-ground vehicles and mechanical aids for agriculture.

**Keywords:** model-based design, simulation, contact interaction, model identification, identification error

**For citation:** Khimchenko A.V., Orobinsky V.I., Mishchenko N.I., Petrov A.I., Volkov S.E. Determination of the parameters of contact interaction of machinery parts using model identification methods. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(1):80-89. (In Russ.). [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2023\\_1\\_80-89](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_1_80-89).

**С**оздание современных не только экономичных, но и экологических источников энергии, которые могут быть использованы в наземных транспортно-технологических средствах, является актуальной задачей. На наземном транспорте и в сельском хозяйстве такими источниками в ближайшее время преимущественно будут оставаться двигатели внутреннего сгорания [1]. Разработка перспективной конструкции двигателя внутреннего сгорания требует системного подхода. На этапе проектирования желательно получить максимальное количество информации о работоспособности отдельных узлов такого двигателя. Аналогичные задачи стоят и при разработке средств механизации сельского хозяйства. Работоспособность объекта должна быть проверена до его изготовления, для чего используются технологии модельно-ориентированного проектирования [3, 5].

На современном этапе развития науки при проведении исследований не принято ограничиваться рассмотрением материальных объектов в отрыве от окружающей среды. Как правило, объекты изучаются как элементы систем. Системный подход позволяет получить информацию о взаимодействии подсистем, однако это создает значительные трудности в теоретических исследованиях.

Одним из современных методов, позволяющих решать сложные технические задачи с использованием системного подхода, является имитационное моделирование технических систем [4, 10, 12]. В зависимости от объекта и задач исследования инженеры и ученые применяют модели различного уровня детализации. В отдельных случаях имеется возможность использовать существующие модели и программные комплексы, в частности при типизации исследовательской деятельности, например при анализе рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания [1, 9]. Если не принимать во внимание финансовую сторону подобного рода научных изысканий, определяющую доступ к программным комплексам, следует отметить, что данный метод имеет ряд особенностей.

Используемые математические модели требуют идентификации, которую, как правило, называют калибровкой. В рамках работы с программным комплексом такая терминология вполне обоснована. Для калибровки необходимо проводить серию экспериментов, которые могут быть затратны по времени и требовать наличия специфического оборудования. Если нет необходимости детально изучать рабочие процессы, можно использовать модели более высокого уровня. Процессы в отдельных узлах и механизмах,

подсистемах модели могут быть описаны упрощенно. Однако для таких моделей также требуется обеспечение адекватности, одним из способов которого является идентификация ее параметров на основе эксперимента с последующей проверкой – верификацией [6–8, 11]. К сожалению, не совсем ясно, какова должна быть степень точности эксперимента для получения приемлемой точности значения параметра модели. В отдельных случаях информация практически отсутствует, и желательно было бы получить приближенные значения параметров модели.

Похожие проблемы были выявлены при разработке бесшатунного двигателя с кривошипно-кулисным механизмом и остановкой поршня [2]. Для понимания рабочих процессов в проектируемых узлах этого механизма Н.И. Мищенко, А.В. Химченко, Ю.В. Юрченко и др. была создана серия имитационных моделей в среде Matlab Simulink, при этом детальное моделирование отдельных узлов было затруднено отсутствием данных. Коллектив авторов столкнулся с необходимостью или использовать обобщенные существующие модели, или проводить углубленные исследования конкретного узла механизма. Результаты таких исследований, несмотря на значительные трудозатраты, достаточно сложно перенести на другие объекты, вот почему исполнители задаются вопросом об их целесообразности.

Аналогичные трудности возникают и при моделировании контактного взаимодействия отдельных деталей в замке фиксации штока поршня. Такие фиксирующие элементы встречаются в различных механизмах, но не в двигателях внутреннего сгорания (ДВС), поэтому необходимо проводить исследования работоспособности деталей и в поршневом ДВС. Контактное взаимодействие двух металлических поверхностей представляет собой ударное упругое взаимодействие с рассеянием энергии. Параметры, характеризующие взаимодействие для данного механизма, неизвестны, а так как они зависят от материала, размеров деталей и энергии соударения, то применение результатов других исследований достаточно затруднительно. В целом для оценки работоспособности достаточно иметь хотя бы приближенные значения параметров. Решением, позволяющим их определить, может быть применение идентификации для модели аналогичного взаимодействия стальных деталей, которое представляет соударение с небольшой кинетической энергией.

Представлены результаты исследования, выполненного с целью определения параметров контактного взаимодействия деталей, проверки возможности использования методов идентификации модели для решения подобных задач и оценки точности полученных результатов для применения при моделировании работы механизма фиксации в двигателе.

Для достижения поставленной цели использовались методы имитационного моделирования, ускоренной видеофиксации натурального эксперимента и методы идентификации, основанные на параметрической оптимизации.

Поскольку необходимо оценить взаимодействие деталей, выполненных из стали, а измерение силовых или кинематических параметров в механизме не представляется возможным, эксперимент проводился с объектами, близкими по свойствам и размерам, что в последствии позволяет оценочно представлять и использовать параметры в имитационных моделях. Оценивались параметры контактного взаимодействия шарика и металлической пластины. Масса шарика соответствовала массе пальца фиксатора, а толщина металлической пластины – толщине штока поршня, равной 16 мм. Следует отметить, что для проверки применимости метода и оценки возможных погрешностей принципиального значения не имеет, какие конкретно детали взаимодействовали.

Металлический шарик от шарикоподшипника падал с известной высоты из неподвижного положения на металлическую пластину. Шарик имел массу 11,9 г и диаметр 14,3 мм. Падение шарика фиксировалось с помощью видео с частотой 60 кадров в секунду на фоне линейки. В дальнейшем видео рассматривалось покадрово в видеоредакторе. Известная частота видеосъемки позволяет примерно оценить время падения и

отскоков шарика от металлической пластины. Однако данное время носит справочный характер, так как получить его с достаточной точностью при данной скорости съемки невозможно. Движение шарика в кадре было размытым (рис. 1). Однако при достижении верхней мертвой точки шарик останавливался, и в кадре можно было измерить его положение с точностью  $\pm 0,5$  мм (рис. 2). Такая же систематическая погрешность была и при установке начального положения шарика. Но на начальное положение шарика влияла и случайная погрешность, которая в абсолютном значении могла быть значительно выше и составлять 3–5 мм. Погрешность при установке начального значения составляла не более 3%, а погрешность измерения положения шарика на втором отскоке достигала 17%.

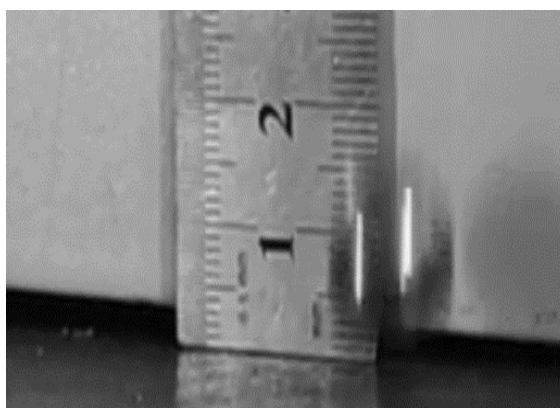


Рис. 1. Движение шарика в кадре при видеофиксации

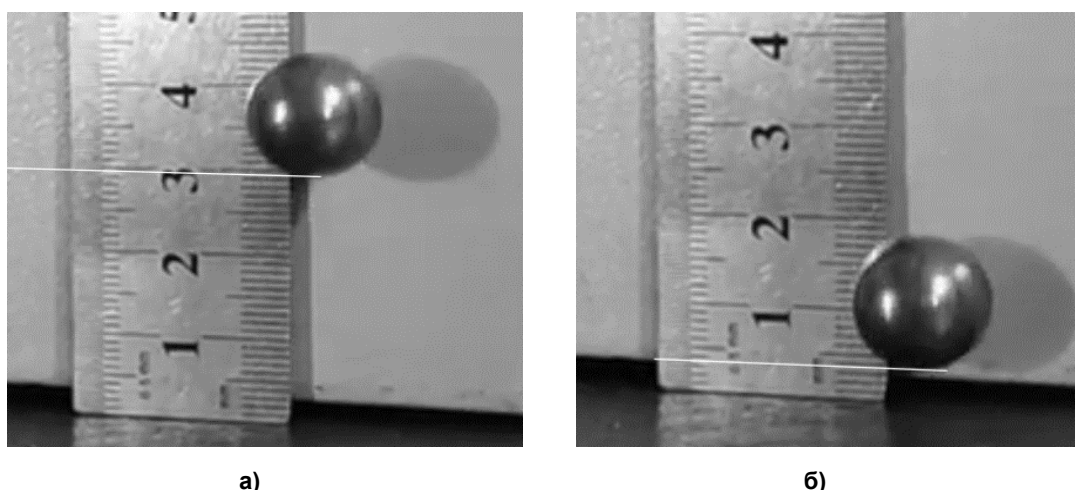


Рис. 2. Измерение положений шарика в верхней мертвой точке при отскоках: а) 1-й отскок; б) 2-й отскок

В эксперименте проводилось 3 опыта с падающим шариком с высоты 200, 250 и 300 мм. Каждый опыт повторялся дважды. Результаты измерений, приведенные в таблице 1, использовали при идентификации модели.

Таблица 1. Результаты измерений отскока шарика

Высота падения $h_0$ , мм	Высота отскока, мм	
	$h_1$	$h_2$
300	29,2	3,8
300	30,8	4
250	25,4	3,9
250	26,3	3
200	23,5	3
200	22,5	3,2

Модель падения шарика была выполнена в среде Matlab Simulink (рис. 3).

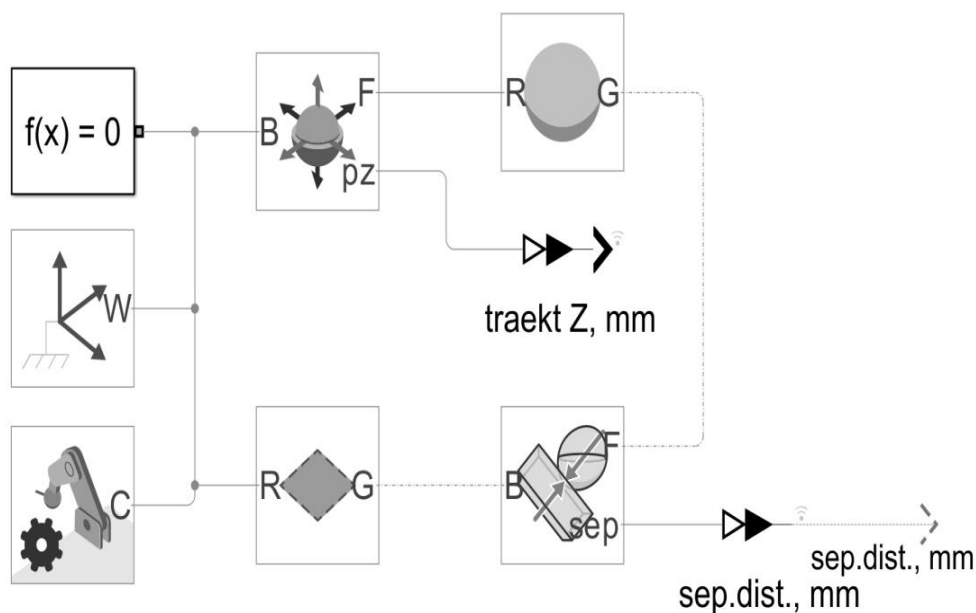


Рис. 3. Модель падения шарика, выполненная в среде Matlab Simulink

При моделировании использовалось допущение, что шарик падает под действием силы тяжести с ускорением свободного падения  $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ . Сопротивление воздушной среды не учитывалось. При отсутствии сил по другим осям и вращения относительно любой из осей изменение координаты  $z$  при падении шарика определяется из математической модели

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dz}{dt} &= -mg + F_N \\ F_N &= k \cdot s + b \cdot \frac{ds}{dt} \end{aligned} \right\},$$

где  $F_N$  – нормальная сила контактного взаимодействия;

$k$  – коэффициент упругости контактного взаимодействия, Н/м;

$s$  – упругая деформация деталей в зоне контакта, м;

$b$  – коэффициент демпфирования, Н/(м/с).

Коэффициенты  $k$  и  $b$  представляют собой параметры модели, которые следует определить при идентификации.

При наличии информации о более сложных моделях они также могут быть реализованы, но на данном этапе это не целесообразно.

Эксперименты по подбору параметров проводились с помощью приложения Parameter Estimator из Identification Toolbox.

Опыты с падающим шариком с высот 200 и 300 мм проводили для подбора параметров, а с высоты 250 мм – для верификации. Кроме того, подбор параметров проводился для всех вариантов опытов одновременно и для каждого индивидуально. Полученные данные использовались в дальнейшем для оценки точности идентификации.

В результате численного оптимизационного эксперимента минимизированные значения суммы квадратов отклонений расчетных значений положения шарика в контрольных точках от экспериментальных, приведенные в таблице 2, показывают, что отклонения достаточно малы для всех экспериментов, в том числе и для используемых для верификации (Exp2\_1, Exp2\_2).

Таблица 2. Результаты минимизации ошибки натурального и численного экспериментов

Сумма квадратов ошибки моделирования при высоте падения, мм <sup>2</sup>					
200 мм	200 мм	250 мм	250 мм	300 мм	300 мм
Exp1_1	Exp1_2	Exp2_1	Exp2_2	Exp3_1	Exp3_2
7.95e-05	1.75e-04	5.34e-04	2.48e-04	1.65e-04	9.09e-05

О высокой точности подбора значений свидетельствуют и графики, приведенные на рисунке 4.

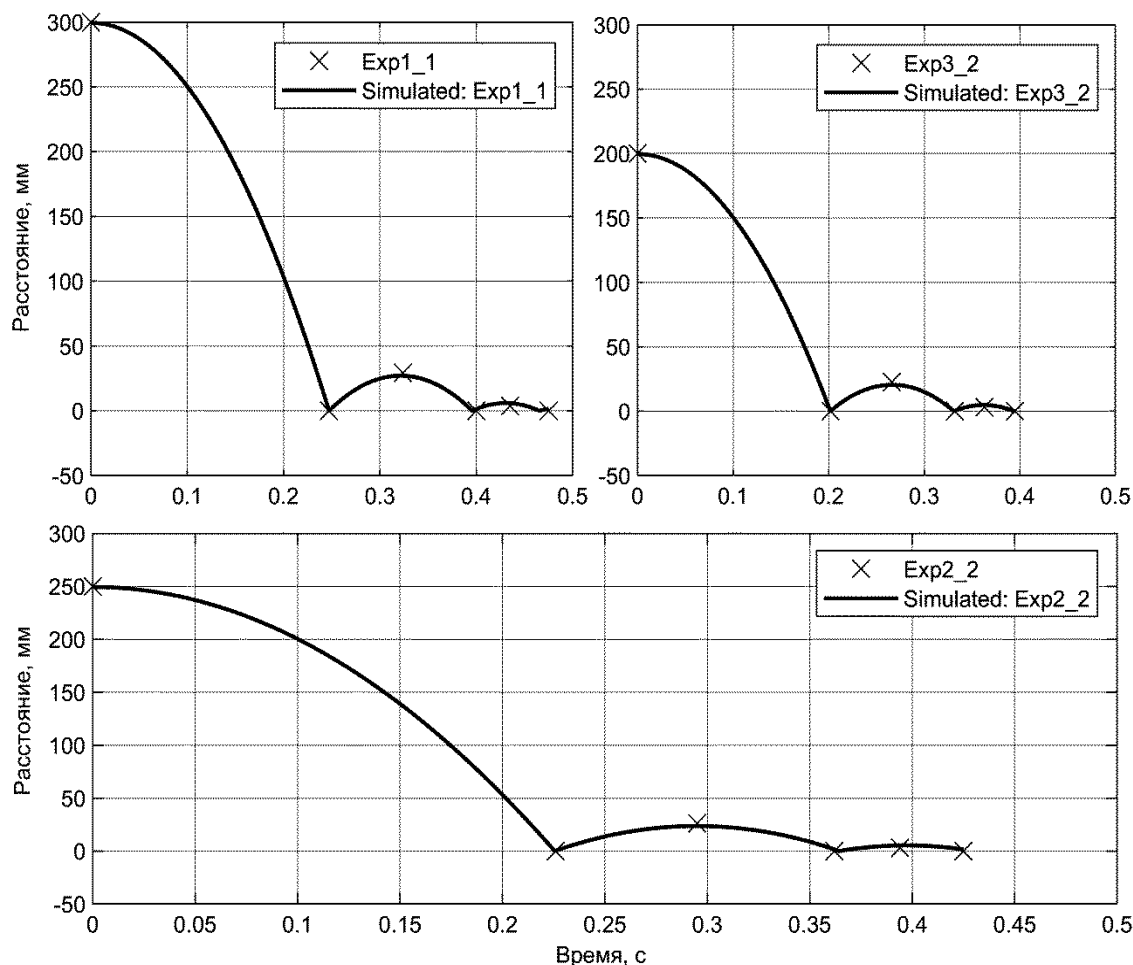


Рис. 4. Сопоставление положения шарика в численном и натурном экспериментах

Результаты подбора параметров для каждого опыта приведены ниже. Полученные при идентификации коэффициенты подвергались статистическому анализу, в том числе регрессионному. Значения параметров контактного взаимодействия, определенные в различных идентификационных экспериментах, приведены в таблице 3. В столбце «Высота падения» отражены опыты, по которым проводился идентификационный эксперимент для определения коэффициентов упругости и демпфирования.

Как видно из таблицы, значения, полученные в разных экспериментах, достаточно близки, а их проверка по критерию Стьюдента для индивидуальной идентификации показала, что коэффициент демпфирования с доверительной вероятностью 95% находился в диапазоне от  $7,5475 \cdot 10^5$  до  $8,0423 \cdot 10^5$  Н/(м/с). Границы доверительного интервала отличались от среднего значения  $7,7949 \cdot 10^5$  менее чем на 3,2%. Что касается

коэффициента упругости контактного взаимодействия, отклонение границ доверительного интервала ( $1,3094 \cdot 10^{11} \dots 1,4427 \cdot 10^{11}$  Н/м) от среднего значения  $1,3761 \cdot 10^{11}$  Н/м составило менее 4,9%. Полученная точность результата вполне приемлема для большинства задач. Вероятную ошибку идентификации параметров модели можно оценить в пределах 5%.

Таблица 3. Параметры контактного взаимодействия шарика и металлической пластины, определенные в различных идентификационных экспериментах

№	Высота падения, мм	Коэффициент упругости, Н/м	Коэффициент демпфирования, Н/(м/с)	Верификация
1	200	$1,3926 \cdot 10^{11}$	760 160	–
2	200	$1,4345 \cdot 10^{11}$	768 960	–
3	250	$1,2922 \cdot 10^{11}$	799 050	–
4	250	$1,3989 \cdot 10^{11}$	806 690	–
5	300	$1,3037 \cdot 10^{11}$	751 950	–
6	300	$1,2619 \cdot 10^{11}$	733 200	–
7	200, 300	$1,4557 \cdot 10^{11}$	809 210	да
8	200, 250, 300	$1,4689 \cdot 10^{11}$	806 690	–

Начальная высота падения шарика определяет его кинетическую энергию в момент удара, что соответственно влияет на зону деформации металла, поэтому даже при небольшой энергии взаимодействия и малом диапазоне изменения ее величина должна оказывать влияние на значение коэффициентов.

Регрессионный анализ показал, что между начальной высотой шарика, то есть кинетической энергией в момент удара, и коэффициентом упругости имеется линейная взаимосвязь с уровнем значимости 0,0396 при оценке по критерию Фишера. Начальная высота падения шарика и коэффициент демпфирования связаны квадратичной зависимостью, при этом скорректированный коэффициент детерминации  $R^2_{кор}$  имеет значение 0,898 с уровнем значимости по Фишеру 0,0152 (рис. 5).

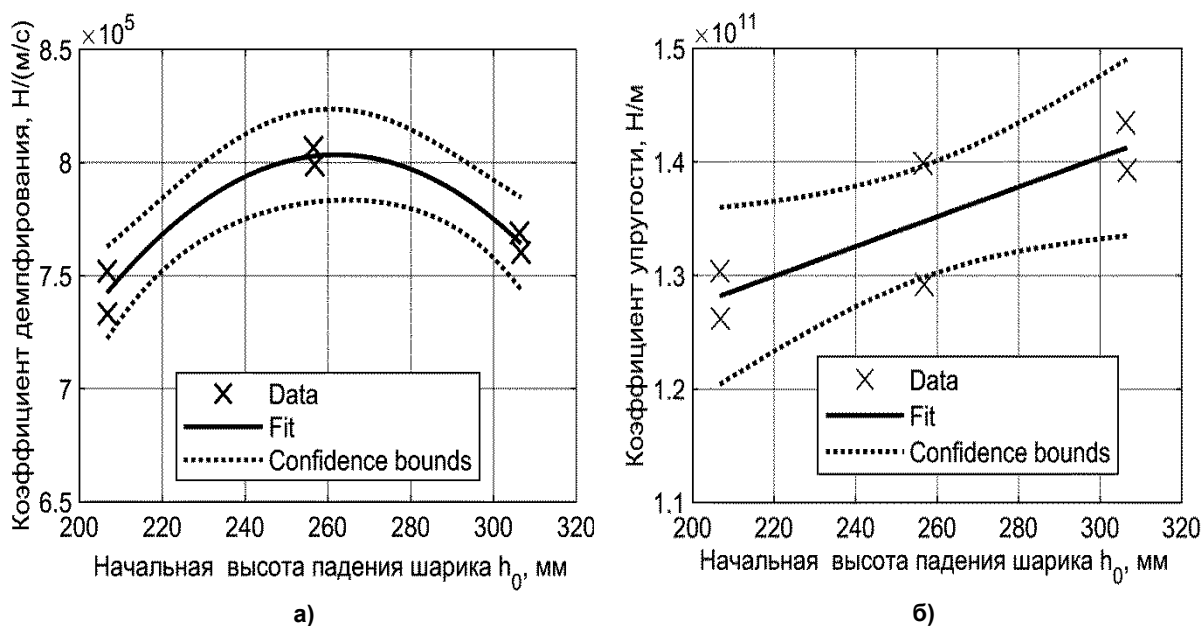


Рис. 5. Результаты регрессионного анализа взаимосвязи коэффициентов упругости (а) и демпфирования (б) от начальной высоты падения шарика

Численные значения коэффициентов уравнений регрессии в данном случае не столь важны, так как эти зависимости не имеют существенной практической значимости. Интерес представляют их статистические оценки. Ниже приведены модели в нотации Вилкинсона и их статистические оценки

а) для коэффициента демпфирования:

Linear regression model:

$$y \sim 1 + x1 + x1^2$$

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	-5.6039e+05	2.0302e+05	-2.7603	0.070136
x1	10406	1615	6.4433	0.0075809
x1^2	-19.848	3.1423	-6.3166	0.0080199

Number of observations: 6, Error degrees of freedom: 3

Root Mean Squared Error: 9.01e+03

R-squared: 0.939, Adjusted R-Squared: 0.898

F-statistic vs. constant model: 22.9, p-value = 0.0152

б) для коэффициента упругости:

Linear regression model:

$$y \sim 1 + x1$$

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
(Intercept)	1.0114e+11	1.1305e+10	8.9463	0.00086346
x1	1.309e+08	4.3512e+07	3.0084	0.039612

Number of observations: 6, Error degrees of freedom: 4

Root Mean Squared Error: 4.34e+09

R-squared: 0.694, Adjusted R-Squared: 0.617

F-statistic vs. constant model: 9.05, p-value = 0.0396

Уровень значимости для pValue всех коэффициентов по двухстороннему критерию Стьюдента достаточно низкий. Вероятность ошибки не превышает 4% за исключением постоянного члена коэффициента демпфирования, где pValue ≈ 0,07. Если необходимо использование регрессионной модели вне исследованного диапазона, то она требует уточнения. При этом уровень значимости модели по критерию Фишера в сравнении с моделью, где коэффициенты постоянны, ниже 5%. То есть в заданном диапазоне варьирования кинетической энергии столкновения деталей некоторая вариативность коэффициентов присутствует и ее следует учитывать.

Важным практическим результатом можно считать то, что при невысокой точности измерений были получены статистически надежные результаты. Полученные параметры модели контактного взаимодействия стальных деталей могут быть использованы при имитационном моделировании для оценки работы механизмов фиксации с учетом полученной точности и аналогии в размерах и силовом взаимодействии. При необходимости углубленного изучения работы механизма, содержащего подобные подсистемы, необходима тщательная проработка и планирование экспериментов для идентификации модели.

В целом предложенная методика работы с моделью позволяет использовать методологию идентификации и получать различные эмпирические зависимости изменения параметров модели в зависимости от режимов работы технической системы. Это расширяет возможности и повышает конечную точность имитационного моделирования.



## Выводы

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что использование методов идентификации модели с помощью параметрической оптимизации позволяет даже при невысокой точности натурального эксперимента получить статистически значимые параметры модели или их эмпирические зависимости от факторов, влияющих на работу системы.

Определенные значения коэффициентов демпфирования и упругости при контактном взаимодействии деталей могут быть использованы при имитационном моделировании в среде Matlab Simulink.

Значения коэффициентов имеют доверительный интервал с погрешностью на его границах, не превышающей 5%. Такую ошибку идентификации можно считать хорошим результатом с учетом точности эксперимента.

Представленные результаты расширяют возможности применения технологии модельно ориентированного проектирования для разработки источников энергии, которые используются в наземных транспортных средствах и средствах механизации сельского хозяйства.

## Список источников

1. Кутенёв В.Ф., Сонкин В.И. Бензиновые двигатели: тенденции развития // ТРУДЫ НАМИ. 2017. № 1(268). С. 6–21.
2. Мищенко Н.И., Химченко А.В., Юрченко Ю.В. и др. Новый бесшатунный двигатель для автомобиля // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: сборник трудов Международной научно-технической конференции (Москва, 31 января 2019 г.). Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2019. С. 383–396.
3. Торопов Е.И., Вашурин А.С., Тумасов А.В. и др. Модельно-ориентированное проектирование при разработке встраиваемого программного обеспечения блоков управления в автомобильной промышленности // Известия МГТУ «МАМИ». 2019. № 3(41). С. 80–85. DOI: 10.31992/2074-0530-2019-41-3-80-85.
4. Химченко А.В., Мищенко Н.И., Дрючин Д.А. и др. Предварительная оценка возможности использования системы смазки серийного двигателя для питания гидропривода механизма остановки поршня // Вести Автомобильно-дорожного института. 2021. № 1(36). С. 15–26.
5. Шестаков И.В., Сафин Н.Р. Применение модельно-ориентированного проектирования при создании грузоподъемного механизма и его привода // Вестник концерна ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ». 2020. № 1(32). С. 64–76. DOI: 10.38013/2542-0542-2020-1-64-76.
6. Abraham M.T., Satyam N., Pradhan B., Tian H. Debris flow simulation 2D (DFS 2D): Numerical modeling of debris flows and calibration of friction parameters // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022. Vol. 14(6). Pp. 1747–1760. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.01.004.
7. Dennis J.E. (Jr.), Schnabel R.B. Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1983. 380 p.
8. Isermann R., Münchhof M. Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 705 p. DOI: 10.1007/978-3-540-78879-9.
9. Guan J., Liu J., Duan X. et al. Effect of the novel continuous variable compression ratio (CVCR) configuration coupled with spark assisted induced ignition (SAII) combustion mode on the performance behavior of the spark ignition engine // Applied Thermal Engineering. 2021. Vol. 197(5). Article no. 117410. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117410.
10. Ljung L., Glad T. Modeling of dynamic systems. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1994. 361 p.
11. Sjöberg J., Zhang Q., Ljung L. et al. Nonlinear black-box modelling in system identification: A unified overview // Automatica. 1995. Vol. 31(12). Pp. 1691–1724. DOI: 10.1016/0005-1098(95)00120-8.
12. Tinsel E.-F., Verl A. A simulation model extension to enable continuous control tests during the Virtual Commissioning // Procedia CIRP. 2022. Vol. 112. Pp. 97–102. DOI: 10.1016/j.procir.2022.09.046.

## References

1. Kutenev V.F., Sonkin V.I. Benzinovye dvigateli: tendentsii razvitiya [Gasoline engines: development trends]. *Trudy NAMI = The Byulleten' Nauchno-avtomotornogo Instituta*. 2017;1(268):6-21. (In Russ.).
2. Mishchenko N.I., Khimchenko A.V., Yurchenko Yu.V. et al. Novyj besshatunnyj dvigatel' dlya avtomobilya [New connecting rodless engine for a car]. 8-е Луканинские чтения. Problemy i perspektivy razvitiya avto-transportnogo kompleksa: sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferentsii (Moskva, 31 yanvara 2019 g.) [8<sup>th</sup> Lukanin Scientific Conference. Problems and prospects for the development of the automotive complex: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (Moscow: January, 2019). Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI);2019:383–396. (In Russ.).

3. Toropov E.I., Vashurin A.S., Tumasov A.V. et al. Model'no-orientirovannoe proektirovanie pri razrabotke vstraivaemogo programmnoho obespecheniya blokov upravleniya v avtomobil'noj promyshlennosti [Model-oriented design in the development of embedded software for control units in the automotive industry]. *Izvestiya MGTU "MAMI" = Proceedings of MSTU MAMI*. 2019;3(41):80-85. DOI: 10.31992/2074-0530-2019-41-3-80-85. (In Russ.).
4. Khimchenko A.V., Mishchenko N.I., Dryuchin D.A. et al. Predvaritel'naya otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya sistemy smazki serijnogo dvigatelya dlya pitaniya gidroprivoda mekhanizma ostanovki porshnya [Possibility preliminary assessment of using the lubrication system of a serial engine to power the hydraulic drive of the piston stopping mechanism]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta = Bulletin of the Automobile and Highway Institute*. 2021;1(36):15-26. (In Russ.).
5. Shestakov I.V., Safin N.R. Primenenie model'no-orientirovannogo proektirovaniya pri sozdanii gruzo-pod'emnogo mekhanizma i ego privoda [Model-oriented design in the creation of a lifting mechanism and its drive]. *Vestnik kontserna VKO "ALMAZ – ANTEY" = Journal of "ALMAZ – ANTEY" Air and Space Defence Corporation*. 2020;1(32):64-76. DOI: 10.38013/2542-0542-2020-1-64-76. (In Russ.).
6. Abraham M.T., Satyam N., Pradhan B., Tian H. Debris flow simulation 2D (DFS 2D): Numerical modeling of debris flows and calibration of friction parameters. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022;14(6):1747-1760. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.01.004.
7. Dennis J.E. (Jr.), Schnabel R.B. Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1983. 380 p.
8. Isermann R., Münchhof M. Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 705 p. DOI: 10.1007/978-3-540-78879-9.
9. Guan J., Liu J., Duan X. et al. Effect of the novel continuous variable compression ratio (CVCR) configuration coupled with spark assisted induced ignition (SAII) combustion mode on the performance behavior of the spark ignition engine. *Applied Thermal Engineering*. 2021;197(5):117410. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117410.
10. Ljung L., Glad T. Modeling of dynamic systems. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1994. 361 p.
11. Sjöberg J., Zhang Q., Ljung L. et al. Nonlinear black-box modelling in system identification: A unified overview. *Automatica*. 1995;31(12):1691-1724. DOI: 10.1016/0005-1098(95)00120-8.
12. Tinsel E.-F., Verl A. A simulation model extension to enable continuous control tests during the Virtual Commissioning. *Procedia CIRP*. 2022;112:97-102. DOI: 10.1016/j.procir.2022.09.046.

#### **Информация об авторах**

А.В. Химченко – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», himch.arkady@yandex.ru.

В.И. Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, зав. кафедрой сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей, декан агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, Воронеж, main@agroeng.vsau.ru.

Н.И. Мищенко – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой автомобильного транспорта Автомобильно-дорожного института ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», mim2802@mail.ru.

А.И. Петров – ассистент кафедры автомобильного транспорта Автомобильно-дорожного института ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», alex.petrov1995@hotmail.com.

С.Е. Волков – ассистент кафедры автомобильного транспорта Автомобильно-дорожного института ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», serega-volkov-97@mail.ru.

#### **Information about the authors**

A.V. Khimchenko, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, himch.arkady@yandex.ru.

V.I. Orobinsky, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Dean of the Faculty of Rural Engineering, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, main@agroeng.vsau.ru.

N.I. Mishchenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Automobile Transport, Donetsk National Technical University, Automobile and Highway Institute, mim2802@mail.ru.

A.I. Petrov, Assistant, the Dept. of Automobile Transport, Donetsk National Technical University, Automobile and Highway Institute, alex.petrov1995@hotmail.com.

S.E. Volkov, Assistant, the Dept. of Automobile Transport, Donetsk National Technical University, Automobile and Highway Institute, serega-volkov-97@mail.ru.

**Статья поступила в редакцию 17.02.2023; одобрена после рецензирования 20.03.2023; принята к публикации 26.03.2023.**

**The article was submitted 17.02.2023; approved after reviewing 20.03.2023; accepted for publication 26.03.2023.**

© Химченко А.В., Оробинский В.И., Мищенко Н.И., Петров А.И., Волков С.Е., 2023