

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГИДРОУПРУГОГО МЕХАНИЗМА**Роганов М. Л., Роганов Л. Л., Грановский А. Е.**

Определены актуальность темы исследования и область применения, основной целью которой является составление математических моделей гидроупругого механизма для уточнения расчетов ударных стендов, которые используют в современной технике. Составлено четыре математические модели гидроупругого механизма с использованием различных законов изменения давления рабочей жидкости. Выведена наиболее точная модель гидроупругого привода, учитывающая закон изменения модуля объемной упругости жидкости от давления рабочей жидкости. Произведен анализ математических моделей с учетом параметров физической модели ударного стенда. Отмечено, что различия в результатах расчета увеличиваются с ростом давления в рабочей камере в сравнении с наиболее точной моделью. Сделаны выводы о точности и областях применения данных математических моделей гидроупругого механизма.

Визначені актуальність теми дослідження та область використання, основною метою якого є складання математичних моделей гідропружного механізму для уточнення розрахунків ударних стендів, котрі використовують у сучасній техніці. Складено чотири математичні моделі гідропружного механізму з використанням різних законів зміни тиску робочої рідини. Виведено найбільш точну модель гідропружного приводу, котра враховує закон зміни модуля об'ємної пружності рідини від тиску робочої рідини. Зроблено аналіз математичних моделей з урахуванням параметрів фізичної моделі ударного стенда. Відмічено, що відмінності у результатах розрахунків зростають з зростом тиску у робочій камері в порівнянні з найбільш точною моделлю. Зроблено висновки про точність та області використання даних математичних моделей гідропружного механізму.

The research relevance and sphere of application have been determined, the main goal of which is the development of mathematical models of hydroelastic motion aimed at the computational clarification of the shock stands which are used in modern technics. Four mathematical models of hydroelastic motion for different laws of pressure change of working fluid have been drawn up. The most accurate model of hydroelastic drive has been derived, which takes into account the bulk modulus variation of the fluid pressure of working fluid. Analysis of the mathematical models within the parameters of the impact stand physical model has been done. It was noticed that differences at a results of calculations increase with the pressure growth at the working chamber versus the most accurate model. Conclusions about the data accuracy and spheres of application of mathematical models of hydroelastic motion have been inferred.

Роганов М. Л.

канд. техн. наук, доц., директор ИПКПК

Роганов Л. Л.

д-р техн. наук, проф. каф. МТО ДГМА
lev.roganov@dgma.donetsk.ua

Грановский А. Е.

магистр ДГМА

ИПКПК – Институт повышения квалификации и переподготовки кадров, г. Краматорск.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.81:539.3/.5

Роганов М. Л., Роганов Л. Л., Грановский А. Е.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГИДРОУПРУГОГО МЕХАНИЗМА

Работа посвящена усовершенствованию расчета гидроупругого механизма (ГУМ), который нашел применение в различных машинах. Применение ГУМ началось в машинах для обработки металлов давлением (ОМД) примерно 30 лет назад. Гидроупругий механизм был применен в машинах ОМД типа молотов, пресс-молотов, машинах для листовой штамповки эластичной средой, машинах для отрезки проката, труб, заготовок [1–11]. ГУМ применяется в машинах, когда требуется приложение больших сил за короткий промежуток времени (время действия силы от 0,01 до 0,001 секунды). Сравнительно высокая точность действия сил во времени позволяет эффективно использовать ГУМ в испытательной технике типа ударных стендов для испытания изделий статическими, динамическими и вибрационными нагружениями в различной их комбинации. Усовершенствование устройства ГУМ и расширение области его применения для совершенствования технологий и машин разных отраслей машиностроения происходит и в настоящее время [12, 13], что говорит об актуальности данной темы.

Целью данной статьи является уточнение зависимостей основных характеристик гидроупругого механизма для более точных расчетов ударных стендов, применяющихся в современной технике.

В данном случае математическая модель создана для имеющейся физической модели ударного стенда, и она является одномассовой. Одномассовая модель рассматривается в предположении, что амортизаторы отсутствуют – основание жестко связано с фундаментом, а упругие элементы, соединяющие штоки тормозных цилиндров с платформой, заменены недеформированными элементами. При этом модель ударного стенда имеет вид, представленный на рис. 1, а. Расчетная схема такой модели представлена на рис. 1, б.

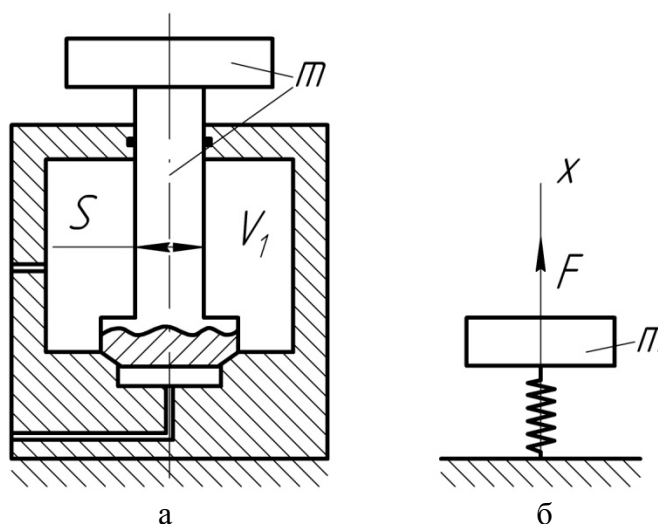


Рис. 1. Расчетные схемы ударного стенда:
а – одномассовая модель; б – расчетная схема

Дифференциальное уравнение движения плунжера имеет вид (1):

$$m\ddot{x} = pS, \quad (1)$$

где m – масса плунжера и других подвижных частей;

\ddot{x} – вторая производная от координаты плунжера x (ускорение плунжера);

p – давление жидкости в рабочей камере;

S – площадь поперечного сечения плунжера.

Данной модели соответствует закон изменения давления по зависимости (2):

$$E = -\frac{\Delta p}{\Delta V} V_1, \quad (2)$$

где Δp – изменение давления; ΔV – изменение объема V .

При условии, что модуль объемной упругости рабочей жидкости есть величина постоянная, не зависящая от давления, измеренная при давлении 0,1 МПа:

$$p = p_1 - E_0 \frac{S}{V_0} x, \quad (3)$$

где p_1 – начальное давление рабочей жидкости при срабатывании привода;

E_0 – модуль упругости жидкости при температуре 20°C и давлении $p_a = 0,1$ МПа;

V_0 – объем сжимаемой жидкости.

Дифференциальное уравнение (1) с учетом закона изменения давления (3) примет вид:

$$m\ddot{x} = p_1 S - E_0 \frac{S^2}{V_0} x. \quad (4)$$

Если же принять, что давление в рабочей камере при срабатывании привода изменяется по закону (5) [14]:

$$p = p_1 - E_{cp} \frac{S}{V_0} x, \quad (5)$$

где $E_{cp} = 0,5(E_0 + E_1)$ – среднее значение модуля упругости в интервале давлений от p_a до p_1 .

То математическая модель примет вид (6):

$$m\ddot{x} = p_1 S - E_{cp} \frac{S^2}{V_0} x. \quad (6)$$

Пологая в формуле (2) линейную зависимость модуля объемной упругости от давления (7):

$$E_{cp} = E_0 + cp_{cp}, \quad (7)$$

получаем выражение (8):

$$V_0(\Delta p / \Delta V) = -(E_0 + cp), \quad (8)$$

где $\Delta p = p - p_1$ – изменение давления;

$\Delta V = xS$ – изменение объема рабочей жидкости при расширении.

В этом случае закон изменения давления примет вид (9):

$$p = (p_1 V_0 - E_0 S x) / (V_0 + c x). \quad (9)$$

А дифференциальное уравнение движения плунжера (1) примет вид (10):

$$m\ddot{x} = S(p_1V_0 - E_0Sx)/(V_0 + cx). \quad (10)$$

Если закон изменения давления принять согласно формуле [15] (11):

$$p = \frac{1}{c} \cdot (E_0 + cp_1) \cdot \left(\frac{V_1}{V}\right)^c - \frac{E_0}{c}, \quad (11)$$

то дифференциальное уравнение движения плунжера будет следующим (12):

$$m\ddot{x} = \frac{S}{c} \left[(E_0 + cp_1) \left(\frac{V_1}{V}\right)^c - E_0 \right], \quad (12)$$

где $V = V_1 + Sx$ – общий объем рабочей жидкости.

Тогда окончательно получаем уравнение (13):

$$m\ddot{x} = \frac{S}{c} \left[(E_0 + cp_1) \left(\frac{V_1}{V_1 + Sx}\right)^c - E_0 \right]. \quad (13)$$

Для анализа разработанных математических моделей дифференциальные уравнения (4), (6), (10) и (13) решаются методом Рунге-Кутты с применением ЭВМ.

В качестве исходных данных для расчета были взяты параметры физической модели ударного стенда: объем рабочей камеры $V_1 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; диаметр плунжера $d = 20 \text{ мм}$; масса подвижных частей $m = 0,793 \text{ кг}$; модуль объемной упругости для масла МГЕ-10А при атмосферном давлении $E_0 = 1550 \text{ МПа}$; угловой коэффициент в зависимости $E = f(p)$ $c = 13,14$ [16]. Для анализа рассмотрим два дифференциальных уравнения математической модели (4) и (13), из которых уравнение (13) является более точным.

Расчет производим для давлений 3, 7 и 10 МПа в интервале времени от 0 до 4 мс. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Ударное ускорение для одномассовых моделей

Время действия импульса $t, \text{ мс}$	Ударное ускорение $a_1, \text{ м/с}^2$ при давлении 3 МПа		Ударное ускорение $a_2, \text{ м/с}^2$ при давлении 7 МПа		Ударное ускорение $a_3, \text{ м/с}^2$ при давлении 10 МПа	
	Модель № 1	Модель № 4	Модель № 1	Модель № 4	Модель № 1	Модель № 4
0	1188	1188	2773	2773	3962	3962
0,5	1177	1177	2746	2745	3924	3920
1,0	1143	1142	2667	2661	3810	3797
1,5	1087	1084	2536	2523	3623	3596
2,0	1010	1006	2356	2334	3366	3322
2,5	913,25	907,389	2131	2099	3036	2968
3,0	799,124	791,554	1847	1803	2650	2560
3,5	669,642	660,549	1539	1484	2264	2156
4,0	527,273	517,149	1230	1167	1724	1657

По данным расчетов построены графики ударного ускорения, которые представлены на рис. 2. Графики активного хода и скорости подвижных частей при давлении 10 МПа для модели № 1 и № 4 представлены на рис. 3.

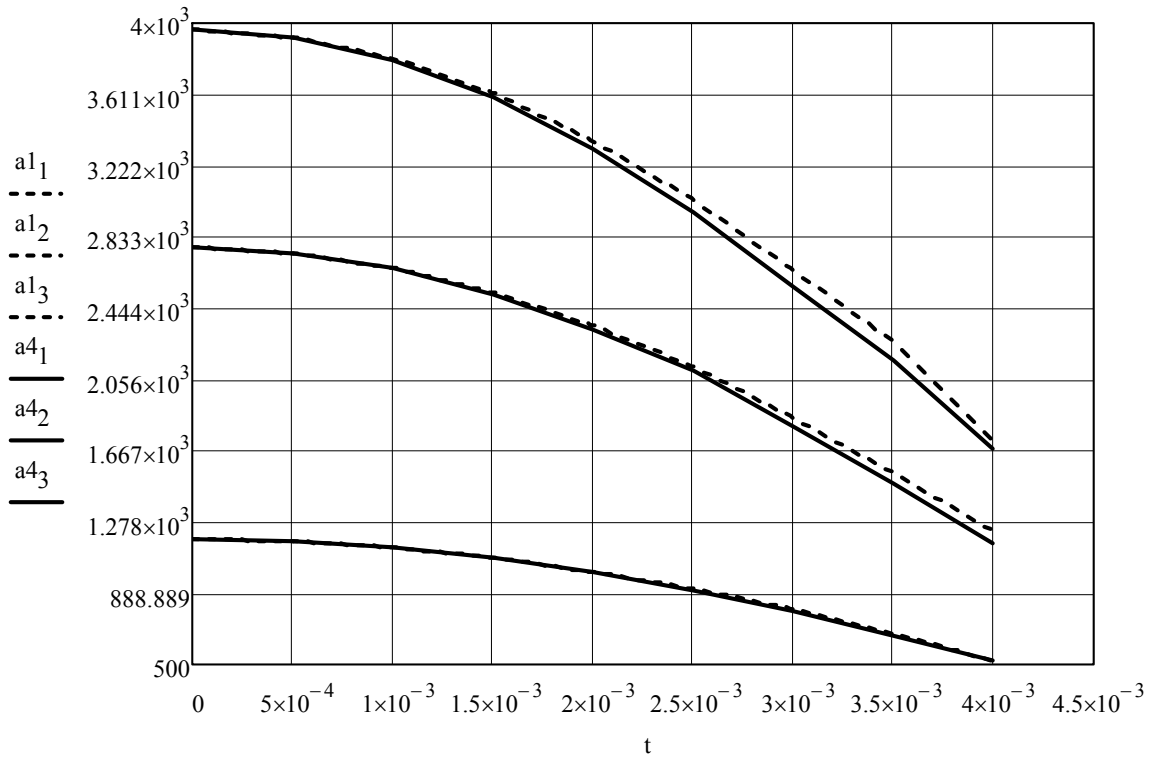


Рис. 2. Графики ударных ускорений для модели № 1 и № 4

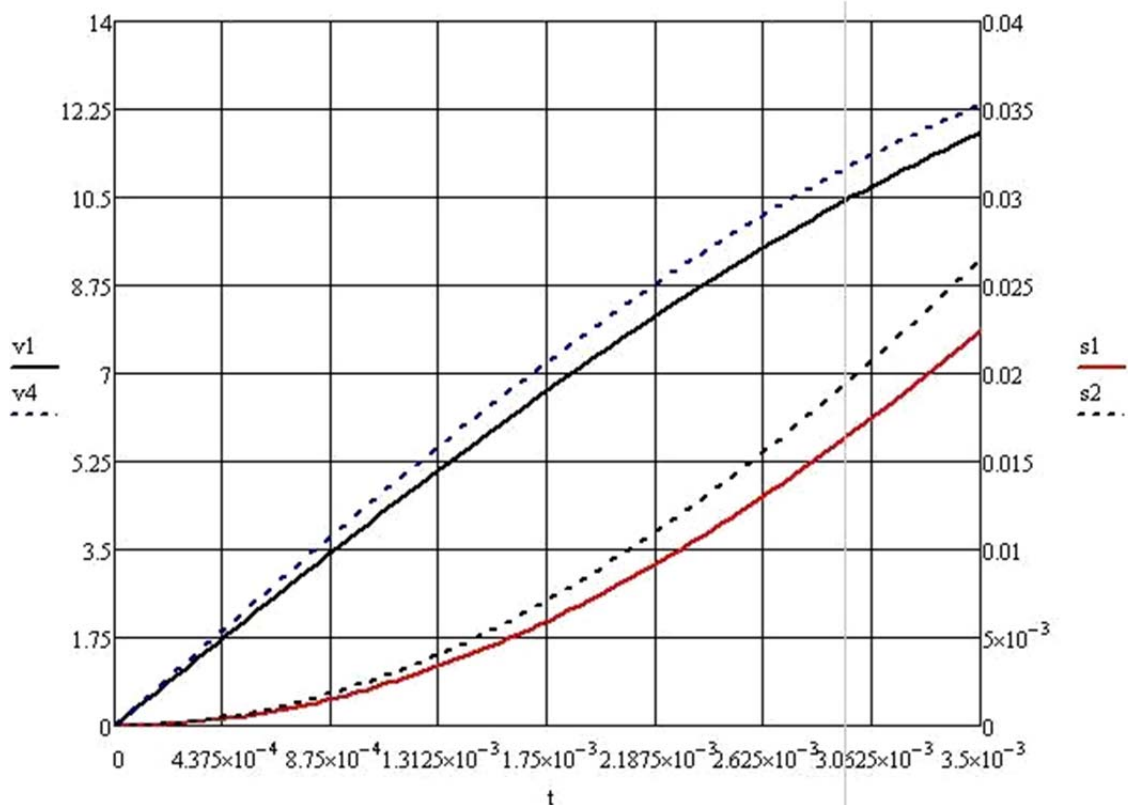


Рис. 3. Графики пути и ускорения для модели № 1 и № 4

ВЫВОДЫ

Из анализа графиков и результатов следует, что модели дают очень близкие значения по определению ускорения, а также хода и скорости. Следует отметить, что различия в результатах расчета увеличиваются с ростом давления в рабочей камере, что, в свою очередь, дает сделать вывод о более рациональном использовании модели № 4 для расчетов при высоких давлениях. Из анализа графиков хода и скорости можно сделать вывод, что упрощенная модель № 1 дает заниженные значения величины хода и скорости по сравнению с наиболее точной моделью № 4.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование и внедрение высокоскоростной резки движущихся труб на машине ударного действия с гидроимпульсным приводом : отчет о НИР (Х34-80) / Краматорский индустриальный институт ; рук. Роганов Л. Л. – Краматорск, 1982. – 90 с. – № ГР 800 68067. – Инв. № 0282.0068572.
2. Исследование, разработка и внедрение пресс-молота гидравлического импульсного : отчет о НИР (Х34-80) / Краматорский индустриальный институт ; рук. Роганов Л. Л. – Краматорск, 1985. – 76 с. – № ГР 0183.0055170. – Инв. № 0285.0010524.
3. Исследование, разработка, изготовление опытного образца и внедрение гидроимпульсной ударной машины для резки движущихся крупногабаритных профилей : отчет о НИР (Х29-82) / Краматорский индустриальный институт ; рук. Роганов Л. Л. – Краматорск, 1986. – 89 с. – № ГР 0182.6036811.
4. К вопросу определения скоростей и ускорений при импульсной обработке металлов / Роганов Л. Л., Мурашко А. И., Александров М. В. [и др.] // Тез. докл. респ. научно-технической конференции «Высокопроизводительные металлосберегающие процессы обработки металлов», 19–20 апреля 1984. – Кишинев, 1984. – С. 145–146.
5. Исследование, разработка и внедрение опытной пресс-молотовой установки с гидроимпульсным приводом для статико-динамического деформирования металлических порошков и порошковых заготовок : отчет о НИР (Х44-83) / Краматорский индустриальный институт ; рук. Роганов Л. Л. – Краматорск, 1986. – 87 с. – № ГР 0183.0073430. – Инв. № 0285.0089445.
6. Диамантопуло К. К. Гамма новых машин для резки движущихся профилей / К. К. Диамантопуло, Л. Н. Соколов, Л. Л. Роганов // Совершенствование кузнечно-штамповочного оборудования ударного действия и создание робототехнических комплексов горячей штамповки : тез. докл. научн.-техн. конф. – Ижевск, 1982. – С. 4–6.
7. Роганов Л. Л. Импульсные машины ударного действия с гидроупругим приводом / Л. Л. Роганов, Л. Н. Соколов, А. Ф. Тарасов // Обработка металлов в машиностроении. – Харьков : Вища школа, 1982. – Вып. 18. – С. 79–83.
8. А. с. 530724 СССР. Гидропружинный молот / Л. Л. Роганов (СССР). – № 2147222 ; заявл. 20.06.1975 опубл. 05.10.76 ; Бюл. № 37.
9. А. с. 912386 СССР. Импульсный привод машины ударного действия / Л. Н. Соколов, К. К. Диамантопуло, Л. Л. Роганов (СССР). – № 2779906 ; заявл. 15.06.1979 ; опубл. 15.03.82 ; Бюл. № 10.
10. А. с. 1009592 СССР. Импульсный гидропривод машины ударного действия / К. К. Диамантопуло, Л. Л. Роганов, М. Г. Старостина (СССР). – № 3364582 ; заявл. 10.12.1981 ; опубл. 07.04.83 ; Бюл. № 13.
11. А. с. 1087797 СССР. Стенд для ударных испытаний / Л. Л. Роганов, Л. Н. Соколов, А. Д. Надирадзе, В. И. Гоголев, О. В. Кузнецов, А. Н. Кулаков (СССР). – № 3556135 ; заявл. 25.11.1982 ; опубл. 23.04.84 ; Бюл. № 15.
12. Роганов Л. Л. Устройство для удержания гидроупругого механизма в исходном положении / Л. Л. Роганов, М. Л. Роганов, Л. Н. Абрамова // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2 (27). – С. 169–172.
13. Роганов Л. Л. Совершенствование технологий и машин для разных отраслей машиностроения на основе развития гидроупругих и клиншарнирных механизмов / Л. Л. Роганов // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2 (27). – С. 163–168.
14. Кондаков Л. А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л. А. Кондаков. – М. : Машиностроение, 1982. – 216 с.
15. Исследование физико-динамических свойств жидкостей с целью использования полученных результатов при создании перспективных гидроупругих приводов : отчет о НИР (Х05-90 НТР) / Краматорский индустриальный институт ; рук. Роганов Л. Л. – Краматорск, 1989. – 37 с. – № ГР 0189.0009099. – Инв. № 029.0039719.
16. Прокофьева В. Н. Машиностроительный гидропривод / В. Н. Прокофьева. – М. : Машиностроение, 1978. – 495 с.