

УДК 621.7.044.4+539.374

Нарыжный А. Г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ РАЗДАЧИ ЗАГОТОВКИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Электрогидравлический метод основан на превращении энергии импульсного электрического разряда в жидкости в ее механическое движение с последующим действием на технологический объект [1, 2]. При использовании электрогидравлического эффекта в технологической системе присутствуют и активно взаимодействуют элементы, находящиеся в трех агрегатных состояниях: твердом (деформируемая заготовка и оснастка), жидком (передающая среда) и газообразном (ионизированные продукты испарения).

Механические процессы, являющиеся основой технологического действия, протекают в особых условиях:

- контрастность механических свойств – упругопластичность заготовки, нелинейная вязкоупругость и кавитация жидкости, а также особая термоупругость паров жидкости, описываемые уравнениями состояния [1, 2];

- контактно-ударный характер взаимодействия элементов системы. Элементы, находящиеся в жидком и твердом агрегатных состояниях, взаимодействуют с ударом и трением на ситуационно образующихся зонах контакта, которые могут исчезать и вновь образовываться и иметь при этом сложную неодносвязную форму;

- импульсный характер возмущения вместе со сжимаемостью порождает волновой, а затем колебательный характер полей давления и скорости. Разница упругих свойств элементов обуславливает сложный спектр колебаний. Деформирование заготовки протекает в течение волнового, колебательного и квазистационарного этапов, переход между которыми является самопроизвольным [2];

- кратковременность и интенсивность процессов. Длительность электрического импульса составляет десятки микросекунд. Длительность процесса до установления окончательной формы детали составляет миллисекунды. Скорости паровой полости, жидкости и заготовки достигают сотен метров за секунду. Давления достигают десятков тысяч атмосфер. Температуры в газовой полости достигают десятков тысяч градусов по шкале Кельвина [2];

- существенная нелинейность процессов, обусловленная пластичностью заготовки, кавитацией жидкости, контактным взаимодействием элементов, вытекающая из описания этих свойств в виде неравенств;

- значительная неоднородность полей перемещений, скоростей, деформаций и напряжений во времени и в пространстве;

- большие перемещения, конечные деформации, имеющие для жидкости и парогазового пузыря форму струйных и вихревых течений [1].

Внедрение электрогидравлических методов в промышленность проходило, в основном, путем изобретений, вследствие чего многие важные вопросы остались не изучены [2]. Методические проблемы исследований обусловлены нарушениями гипотезы сплошности при контакте и кавитации, существенной нелинейностью, самопроизвольным переходом волнового этапа в колебательный, а его – в квазистационарный, широким диапазоном и высокой скоростью изменения параметров, а также электрическими помехами.

Эти проблемы, за исключением последней, встречаются при изучении объектов прикладной механики направления FSI (Fluid Structure Interaction- взаимодействие текучих сред и конструкций) [3]. Основным методом FSI-компьютерное моделирование. В связи с значительными деформациями текучих сред традиционные лагранжевы сеточные методы, например, распространенный метод конечных элементов, не позволяют проводить моделирование специфических процессов в широком диапазоне изменения технологических параметров [5]. Для формулирования и дискретизации механико-математических моделей (МММ) объектов FSI

нашли применение, в частности методы SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) и ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) [3, 4]. Ранее была рассмотрена поршневая модель ЭГШ с применением SPH [5] конечно-элементная модель с кинематическим импульсным возмущением [6].

Целью статьи является описание МММ на основе подхода ALE и результатов моделирования.

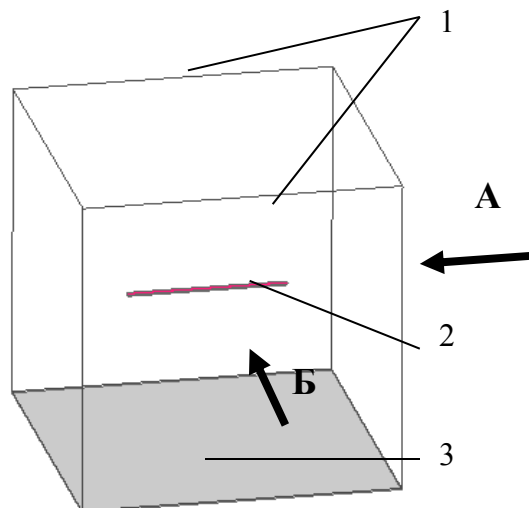


Рис. 1. Схема модели:

1 – контейнер с жидкостью; 2 – канал разряда; 3 – заготовка

На рис. 1 показана схема модели, включающая: 1 – жесткий недеформируемый контейнер в форме параллелепипеда с внутренними размерами $100 \times 105 \times 105$ мм (ширина \times высота \times глубина, показаны ребра), наполненный жидкостью (условно не показана); 2 – канал электрического разряда с размерами $50 \times 1 \times 1$ мм, наполненный пароплазменной фазой; 3 – заготовка прямоугольной формы с размерами $100 \times 105 \times 1$ мм, жестко закрепленная по контуру. В дальнейшем канал разряда развивается в парогазовую полость (ППП).

Нестационарные механические процессы в системах сжимаемых сплошных твердых, жидких и газообразных сред определяются несколькими группами условий, имеющих вид равенств или неравенств. Ниже используются три системы отчета: эйлера неподвижная с координатами x , лагранжева материальная с координатами X , и движущаяся по заданному закону референсная (вспомогательная) с координатами χ .

Вводятся материальная скорость:

$$v(X,t) = \left. \frac{\partial x}{\partial t} \right|_X = \frac{\partial x}{\partial t}; \quad (1)$$

– скорость переносного движения (скорость точки референсной системы отчета):

$$\hat{v}(\chi,t) = \left. \frac{\partial x}{\partial t} \right|_\chi; \quad (2)$$

– относительная скорость (скорость конвекции) точки в референсной системе отчета:

$$c = v - \hat{v}. \quad (3)$$

Уравнение движения (уравнение сохранения импульса) в подвижной референсной системе отчета [4]:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} \Big|_{\chi} + (c \cdot \nabla)v \right) = \nabla \cdot \sigma + \rho b, \quad (4)$$

где ρ – плотность;

$\dot{\chi}$ – вектор скорости эйлеровой сетки;

v – вектор скорости материальной частицы;

b – массовая плотность внешних сил;

σ – симметричный тензор напряжений Коши;

∇ – дифференциальный оператор набла.

Уравнение сохранения массы [4]:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \Big|_{\chi} + c \cdot \nabla \rho = \rho \nabla \cdot v. \quad (5)$$

Уравнение баланса энергии [4]:

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{\chi} + c \cdot \nabla u \right) = \sigma : D, \quad (6)$$

где u – массовая плотность внутренней энергии;

$D = \frac{1}{2} (\nabla v + \nabla^T v)$ – симметричный тензор скоростей деформации, слагаемое в правой

части представляет мощность внутренних сил.

Референсная система отсчета может двигаться по определенному закону, совпадать с материальной или эйлеровой системами отсчета. Уравнения (4)–(6) позволяют эквивалентно переносить изменения функций, определяющих механическое состояние материальной точки, из одной системы отсчета в другую и таким образом снимать методическое различие решения задач. Важным различием задач гидродинамики и твердого деформируемого тела является то, что первые используют эйлеров подход, а вторые – лагранжев. При эйлеровом подходе не возникает затруднений описание характерных для жидкостей и газов больших перемещений, имеющих характер струй и вихрей, но существуют проблемы описания поверхностей раздела как свободных, так, в особенности, контактных. При лагранжевом подходе в силу того, что материальная система координат просто описывает начальные границы в процессе движения, легко выразить граничные и контактные условия на старых границах тела. Трудности возникают при образовании новых границ или при больших перемещениях вихревого типа, то есть когда нарушается принцип сплошности, а именно, материальные точки, бывшие бесконечно близкими друг к другу, отдаляются на конечное расстояние или, напротив, отдельные материальные точки занимают одно положение в пространстве одновременно. При исследовании гетерогенных механических систем, включающих элементы, находящиеся в различных фазовых состояниях, разделенных поверхностями, по которым они входят в контактное взаимодействие, необходимо использовать единую систему отсчета или иметь возможность перехода из одной системы отсчета (например, лагранжевой) в другую (например, эйлерову).

Приведенные формы законов сохранения позволяют ситуативно менять систему отсчета для определения левых частей уравнений, которые определяют зависимость изменения НДС от времени, что является основой подхода ALE, в то время как правые части, определяющие зависимость изменения в пространстве, записаны в традиционной эйлеровой форме и сохраняют свое значение. Такое расширение (унификация) уравнений сохранения получило название квази-эйлерова подхода [7].

Уравнение состояния пароплазменной фазы [2]:

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} U, \quad (7)$$

где P – давление газа;

γ – постоянная адиабаты;

ρ, ρ_0 – актуальная плотность и плотность при нормальных условиях;

U – удельная внутренняя энергия как функция абсолютной температуры. Первое начало термодинамики для ППП:

$$Jdt = dU + PdV, \quad (8)$$

где J – поток тепла (омические потери, определяемые в соответствии с [2, 6]);

P, V – давление и объем ППП, соответственно.

В расчетах приняты значения параметров: $\gamma = 1,26$, $\rho_0 = 1,25 \text{ кг/м}^3$. Возмущение в системе определяется заданием начального значения величины внутренней энергии 500 Дж и относительного объема в канале разряда, равного 0,001, и выделением омического тепла со скоростью $1,373 \cdot 10^{12} \text{ Дж/(с м}^3)$ в течение первых $3 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ процесса, в целом 660 Дж.

Уравнение состояния линейно сжимаемой жидкости (воды):

$$P = K(1 - \rho_0/\rho), \quad (9)$$

где $K = 2,25 \cdot 10^9 \text{ Па}$ – модуль объемного сжатия.

Скорость девиатора напряжений в жидкой и пароплазменной фазах обусловлена вязкостью:

$$\dot{S}_{ij} = \nu \Delta l a \rho \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (10)$$

где ν – коэффициент динамической вязкости менялся в расчетах в пределах 0–0,1 с⁻¹;

Δl – характерный размер;

a – скорость звука.

Полный тензор напряжений определяется как сумма шарового тензора и девиатора:

$$\sigma = -PI + S, \quad (11)$$

где I – единичный тензор.

Кавитация жидкости учитывается посредством ограничения растягивающего напряжения (давления кавитации):

$$P > P_c = -10^4 \text{ Па}. \quad (12)$$

Материал заготовки – деформируемый алюминиевый сплав, характеризующийся как упругопластический с линейным деформационным упрочнением и линейно упругой разгрузкой [8]. Использована теория течения. Модуль упругости первого рода $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,33$, модуль упрочнения $\eta = 10^9 \text{ Па}$, плотность $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, начальный предел текучести 10^8 Па .

Контактное взаимодействие описывается кинематическим условием непроницания:

$$u''_{\xi} - u'_{\xi} \leq \Delta, \quad (13)$$

где Δ – величина зазора до деформации;

u''_{ξ}, u'_{ξ} – перемещения точек вдоль нормали к линии контакта и условием равнодействия границ:

$$-\sigma'_{\xi}(\cos \alpha')^{-1} = -\sigma''_{\xi}(\cos \alpha'')^{-1} \leq 0, \quad (14)$$

где $\sigma'_{\eta}, \sigma''_{\xi}$ – проекции тензора напряжений на касательную и нормаль к поверхности контакта, α', α'' – углы между осью η и касательной к границе. Условие (13) означает непрерывность и сжимающий характер нормальных напряжений на границе возможного контакта. В случае контакта с трением по Кулону:

$$|\sigma'_{\eta}| \leq f|\sigma'_{\xi}|, \quad |\sigma''_{\eta}| \leq f|\sigma''_{\xi}|, \quad (15)$$

где f – коэффициент трения по Кулону; выражения определяют условие начала движения границ в касательном направлении [9].

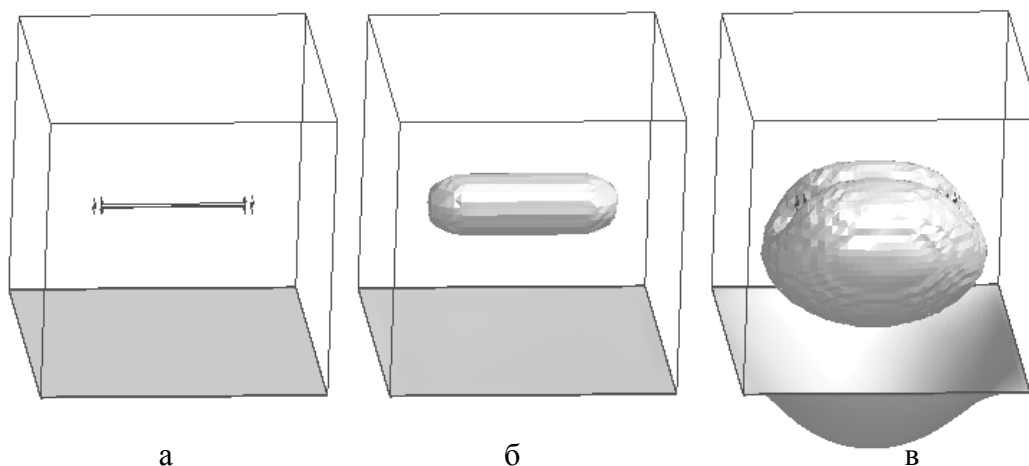


Рис. 2. Изменение формы ППП

На рис. 2 в едином масштабе показаны характерные изменения формы и размеров ППП и заготовки в различные моменты времени (а – 0 с; б – $5 \cdot 10^{-5}$ с; в – $4,5 \cdot 10^{-4}$ с). На рис. 2, б ППП расположена в центре контейнера, имеет осесимметричную в поперечном сечении и в целом округлую форму; заготовка практически сохраняет первоначальную форму. Эти особенности обусловлены тем, что волна давления, отраженная от граней контейнера, еще не достигла поверхности ППП.

На рис. 2, в видно, что ППП приобрела форму «сливы» с продольным желобком и сместилась вниз, при этом объем ППП возрос в сравнении с предыдущим рисунком. В дальнейшем под действием течений жидкости ППП продолжает менять форму; в конце наблюдается фрагментация ППП. Заготовка приняла куполообразную форму.

На рис. 3 показаны зависимости от времени (а) перемещения, (б) скорости перемещения центра масс и (в) изменение объема ППП. Вначале перемещения и скорости равны нулю. Начиная с момента $5 \cdot 10^{-5}$ с, центр масс движется вниз (максимальное перемещение равно 0,016 м, максимальная скорость – 106,9 м/с), а с момента $4,5 \cdot 10^{-4}$ с – вверх (максимальная скорость 48,3 м/с) и с момента $3,5 \cdot 10^{-3}$ с он прекращает движение (асимптотическое перемещение 0,019 м). Задержка времени начала движения связана с действием первой отраженной от верхней грани волны давления. Начало движения вверх связано с приходом отраженной волны снизу и конвективным потоком жидкости, поднимаемой заготовкой в ее возвратном упругом движении. Боковые движения центра масс отсутствуют, что обусловлено симметрией возмущения.

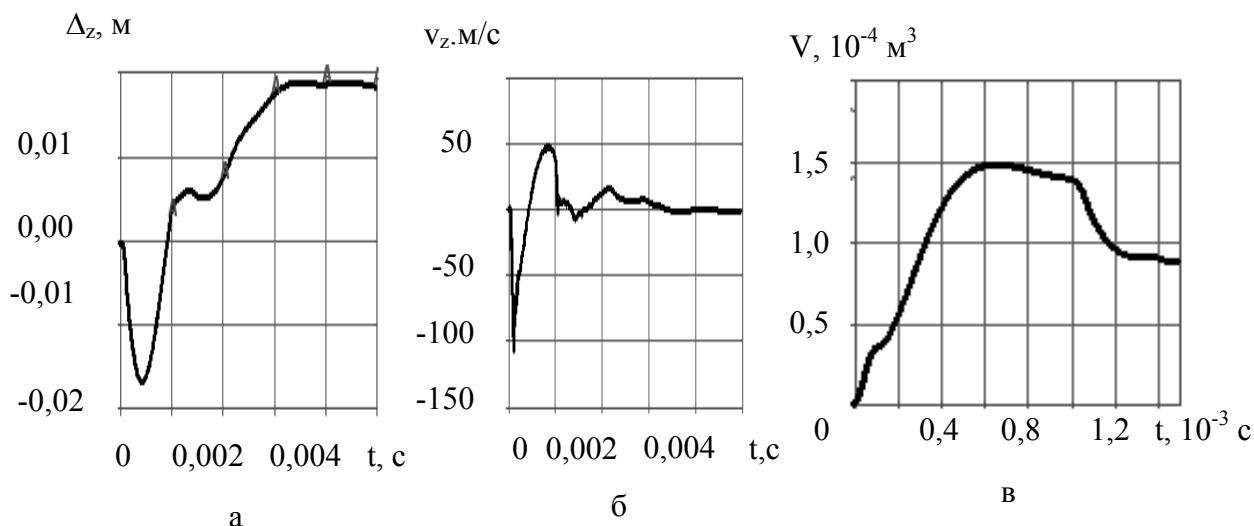


Рис. 3. Зависимость параметров движения ПГП от времени

На рис. 3, в показана зависимость объема ПГП от времени. До момента времени $0,6 \cdot 10^{-3}$ с объем растет до величины $1,496 \cdot 10^{-4}$ м³, увеличиваясь в 2990 раз по сравнению с начальным значением, затем уменьшается и в конце стабилизируется. Увеличение объема объясняется, во-первых, начальными давлением и энергией, во-вторых, притоком тепла и, в-третьих, перемещением заготовки.

На рис. 4 показаны поля давления на гранях жидкости в контейнере в моменты выхода волновых фронтов (а – $t = 2 \cdot 10^{-5}$ с; б – $t = 3,5 \cdot 10^{-5}$ с), синим цветом показана невозмущенная зона. Вначале выходит фронт на грань 1, ближе расположенную к концу канала, затем одновременно на грани 2 и 3, параллельные оси канала; время задержки позволяет оценить скорость распространения волны давления в жидкости, она равна 1660 м/с. Поле давлений на грани 1 имеет осесимметричную форму, а на гранях 2 и 3 – продолговатую овальную форму, причем структура и значения давлений одинаковы.

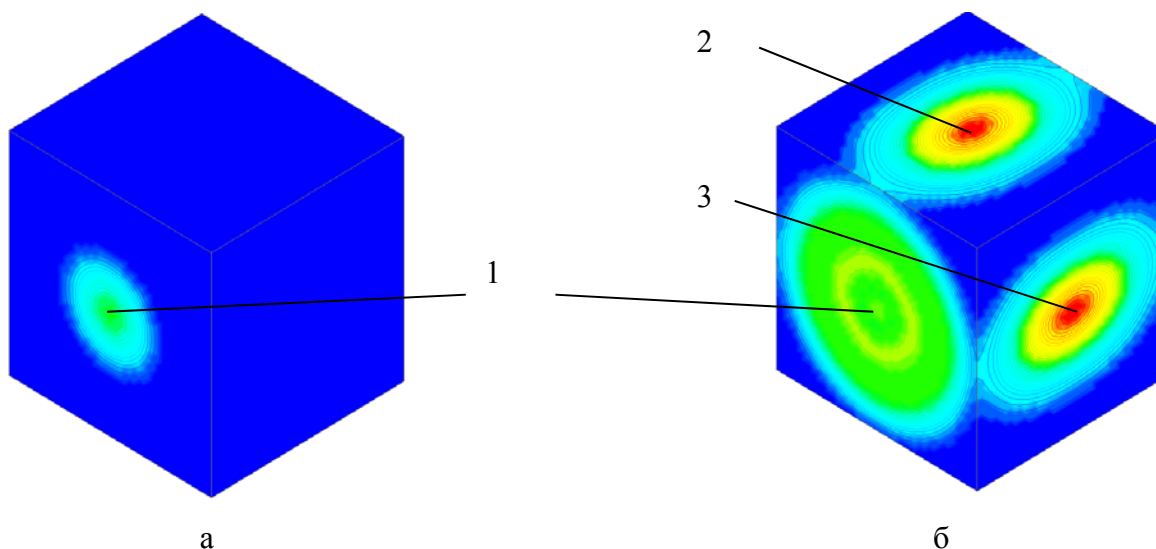


Рис. 4. Поля давления на поверхности жидкости

Разница формы полей объясняется формой фронта волны давления, который повторяет вид ПГП, показанный на рис. 2, б. Значения давлений на гранях 2 и 3 выше, чем на грани 1 ($6,4 \cdot 10^7$ Па и $4,7 \cdot 10^7$ Па, соответственно). Более высокие значения обусловлены тем, что на гранях 2 и 3 возмущение интегрируется по длине ПГП, а на грани 1 по поперечнику, который

значительно меньше. Поля давлений смыкаются на смежных ребрах, поля давлений неоднородны. В жидкости распространяются отраженные волны, наблюдается интерференция, отраженные волны начинают действовать на ППП (рис. 2, в), в целом, поле давлений самопроизвольно теряет осесимметричную структуру.

На рис. 5 показана структура полей давления в виде изобар на противоположных гранях (а – верхняя, б – нижняя) объема жидкости в момент выхода волнового фронта на поверхность ($t = 3,5 \cdot 10^{-5}$ с). Видно, что максимальные давления, действующие на заготовку, более чем вдвое меньше таковых, действующих на жесткую стенку.

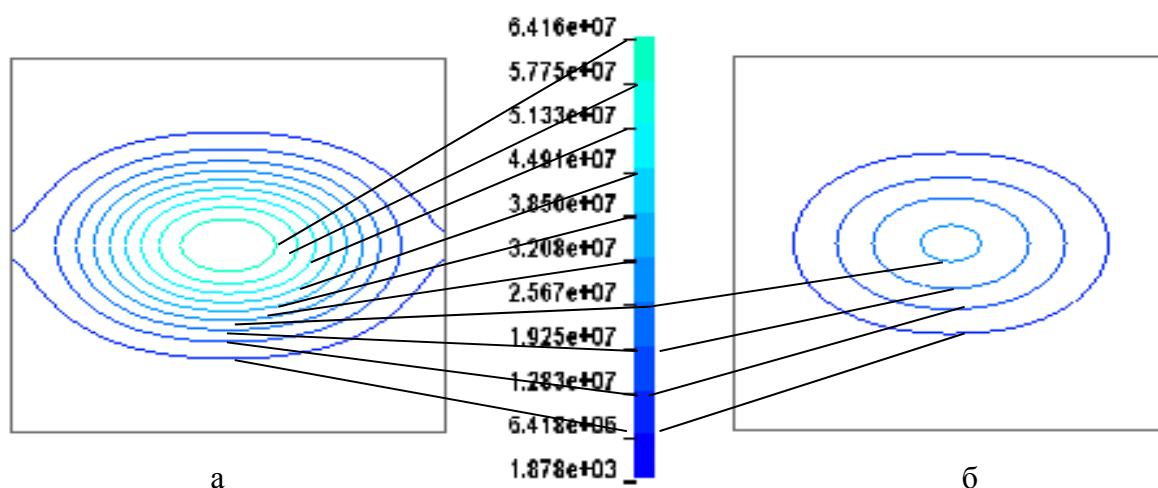


Рис. 5. Структуры поля давления на жесткой верхней (а) и нижней (б) гранях

На рис. 6, а показана зависимость перемещения центра заготовки от времени. Вначале перемещения неизменны, что связано с длительностью движения волны давления от канала разряда до заготовки, затем перемещения растут. В момент времени $5 \cdot 10^{-4}$ с заготовка приобретает максимальное перемещение, равное 0,0397 м, затем перемещения уменьшаются и, начиная с момента $2 \cdot 10^{-3}$ с, перемещения практически неизменны.

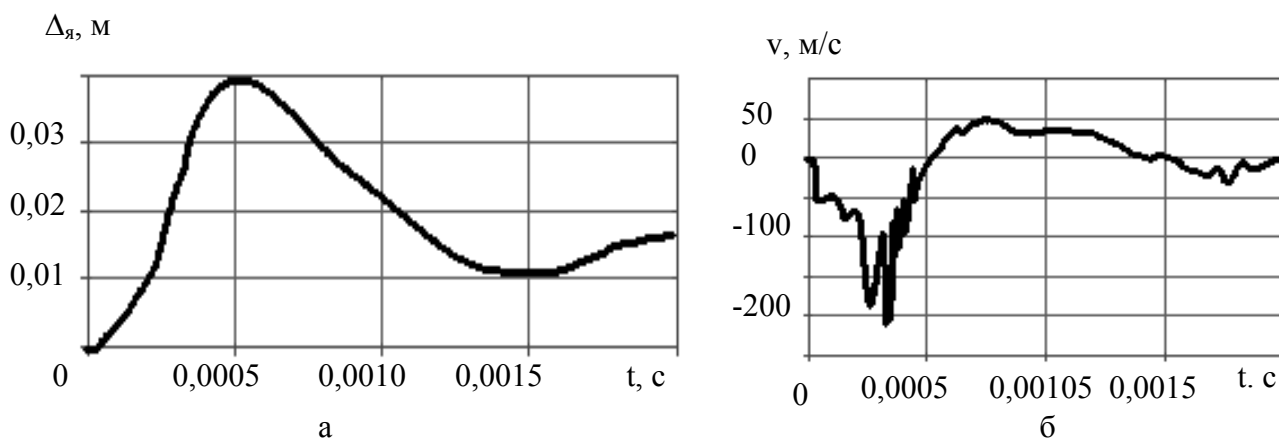


Рис. 6. Зависимость параметров движения заготовки от времени

На рис. 6, б показана зависимость скорости той же точки от времени. Также наблюдается задержка, затем рост скорости, который сопровождается колебаниями и в момент времени $3 \cdot 10^{-4}$ с скорость достигает максимума в абсолютном значении, равного 209,9 м/с. После момента $2 \cdot 10^{-3}$ с скорость практически равна нулю.

ВЫВОДЫ

В модели учтены четыре основных элемента: ПГП, жидкость, заготовка и оснастка.

Также в модели учтены три фактора, вызывающие электрогидравлический эффект: начальное сжатие, начальный уровень внутренней энергии, возникающие при электрическом пробое и фазовом превращении жидкости, а также разогреве при течении тока.

Предложенная модель адекватно воспроизводит закономерности и особенности поведения элементов технологической системы, описанные в литературе и наблюдаемые экспериментально. ПГП, многократно расширяясь, принимает округлую форму, а в конце распадается на фрагменты. Очень быстро ПГП «забывает» особенности первоначальной формы. До прихода отраженных волн ПГП имеет осесимметричную форму, после прихода теряет ее и движется под действием поля давления. Жидкость испытывает ударное действие ПГП, в ней распространяется волна давления со скоростью, несколько превосходящей скорость звука; волновой этап произвольно переходит в затухающие колебания. Заготовка начинает деформироваться с приходом волны давления, а затем – потока жидкости; наблюдается упругая релаксация. Все особенности поведения вытекают из общих уравнений механики (определяющих уравнений модели), а не предписаны заранее. Количественные значения параметров движения соответствуют эмпирическим значениям.

Предложенная модель позволяет построить количественные зависимости, известные ранее лишь качественно, например, зависимость давления, испытываемого заготовкой, от времени и других технологических факторов, а также провести исследования, например, штамповки в матрицу с учетом технологических прокладок, прочности и стойкости электродов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тараненко М. Е. *Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, технологические процессы* / М. Е. Тараненко. – Харьков : ХАИ, 2011. – 272 с.
2. Мазуровский Б. Я. *Электрогидравлический эффект в листовой штамповке* / Б. Я. Мазуровский, Ф. Н. Сизев. – Киев : Наукова думка, 1983. – 192 с.
3. *Fluid Structure Interaction II. Modelling, Simulation, Optimization* / Ed. H.-J. Bungartz, M. Mehl, M. Schafer. – Springer, 2010. – 424 p.
4. Donea J. *Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods* / J. Donea, A. Huerta, J.-P. Ponthot, A. Rodriguez-Ferran // *Encyclopedia of Computational Mechanics*. – John Wiley & Sons, 2004. – P. 1–38.
5. Нарыжный А. Г. *Вычислительная компьютерная модель электрогидравлической листовой штамповки* / А. Г. Нарыжный, М. Е. Тараненко // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 34–40.
6. Mamutov A. V. *Computer simulation of electrohydraulic sheet metal forming* / A. V. Mamutov, V. S. Mamutov // *Nanodesign, technology and computer simulation : proc. of SPIE*. – 2007. – V. 659, 65970Y. – P. 1–5.
7. Belytschko T. *Quasi-Eulerian finite element formulation for fluid-structure interaction* / T. Belytschko, J. M. Kennedy, D. F. Schaeberle // *J. Press. Vessel Technol : trans. ASME*. – 1980. – V. 102. – P. 62–69.
8. Коларов Д. *Механика пластических сред* / Д. Коларов, А. Балтов, Н. Бончева. – М. : Мир, 1979. – 302 с.
9. Бураго Н. Г. *Численное решение задач МСС с подвижными границами раздела: дис...д-ра физ.-мат. наук : 01.02.04* / Бураго Николай Григорьевич. – М., 2003. – 222 с.

Нарыжный А. Г. – канд. техн. наук, доц. НАУ «ХАИ».

НАУ «ХАИ» – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков.

E-mail: NarizniyAG@ukr.net

Статья поступила в редакцию 16.02.2012 г.