

Вычислительная модель электрогидравлического эффекта

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Описана механико-математическая модель электрогидравлического эффекта в механической системе, включающей в себя парогазовую полость, технологическую жидкость и жесткую разрядную камеру. Парогазовая полость получает возмущение в виде начального давления, внутренней энергии и потока тепла. Использован смешанный подход ALE. Приведены результаты моделирования, количественно отражающие особенности поведения элементов механической системы. Представлены картины изменения формы парогазовой полости, особенности волновых полей давления в жидкости.

Ключевые слова: электрогидравлический эффект, гидродинамика, моделирование, ALE

Электрогидравлический эффект (ЭГЭ) представляет собой специфический процесс преобразования энергии электрического разряда в жидкости в энергию ее механического движения [1]. В процессе преобразования выделяют три стадии – предпробойную, активную и пассивную [2].

Предпробойная стадия начинается с момента подачи напряжения на электроды и завершается электрическим пробоем жидкости, а также возникновением нитевидных светящихся образований — лидеров. Для этой стадии характерно отсутствие явных значительных механических изменений в системе.

Активная (канальная) стадия характеризуется превращением одного из лидеров в плазменный канал, обладающий высокой проводимостью. В результате быстрого (в течение нескольких единиц или десятков микросекунд) выделения большого количества энергии (порядка $10^3 \dots 10^6$ Дж) происходит как нагрев вещества в канале до температур порядка 15 000...40 000 К, так и расширение канала со скоростью от десятков до сотен метров в секунду. В результате такого расширения в жидкости возникает и распространяется интенсивное гидродинамическое возмущение, носящее характер волны сжатия с разрывом на фронте. Канальная стадия завершается с прекращением тока и переходит в пассивную стадию.

На пассивной стадии канал разряда переходит в парогазовую полость (ПГП). Обычно полость совершает несколько пульсаций, которые служат источником дополнительных гидродинамических возмущений. Значительные механические изменения в системе происходят в течение второй и третьей стадий.

ЭГЭ является основой ряда технологий обработки материалов: листовой штамповки [3, 4], сварки труб [5], уплотнения слитков [6], восстановления деталей [7] и др. Упомянуты иные применения ЭГЭ, например обеззараживание воды [8], дробление камней в почках, интенсификация химических реакций [2].

Процессы проектирования и эксплуатации установок, в которых используется ЭГЭ, предполагают возможность определения гидродинамических параметров ударной волны и гидротока по известным характеристикам разрядного контура. Однако в связи и с недостаточной изученностью процессов, происходящих при электрическом разряде в жидкости, и сложностью их математического описания, а в значительной мере и с неадекватностью математических моделей отмечается отсутствие единой общепризнанной методики определения этих параметров [9]. Это объясняется особым путем внедрения электрогидравлических методов в промышленность в основном, путем изобретений, вследствие чего многие важные вопросы остались не изученными [10].

Механические процессы, являющиеся основой технологического действия, протекают в особых условиях [1, 2, 10]:

–контрастность механических свойств – упруго-пластичность заготовки, нелинейная вязкоупругость и кавитация жидкости, а также особая термоупругость паров жидкости, описываемые уравнениями состояния. Основные элементы технологической системы находятся в различных агрегатных состояниях, одинаковые факторы, например при взаимодействии, вызывают различные реакции элементов;

–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;

–кратковременность и интенсивность процессов. Длительность электрического импульса составляет десятки микросекунд. Длительность процесса до установления окончательной формы детали составляет миллисекунды;

–разнородность и сменяемость характера механических процессов в системе. Импульсный характер возмущения вместе со сжимаемостью порождает волновой, затем колебательный, квазистатический и, наконец, релаксационный этапы развития полей давления и скорости в жидкости. Переход от одного этапа движения к следующему происходит ситуативно и самопроизвольно. Разница упругих свойств элементов обуславливает сложный спектр колебаний. Деформирование заготовки, например, протекает в течение волнового, колебательного и квазистационарного этапов;

–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.

Подобные особенности механических систем встречаются при изучении объектов прикладной механики направления FSI (Fluid Structure Interaction - взаимодействие текучих сред и конструкций) [11]. Основным методом FSI – компьютерное моделирование. В связи со 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 [12]. Для формулирования и дискретизации механико-математических моделей (МММ) объектов FSI нашли применение, в частности методы SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) и ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) [11, 12], использованные при разработке пакета LS-DYNA [13]. Ранее были рассмотрены аналитические модели ЭГЭ [1, 2, 10, 14], тепловые модели [8, 9], поршневая модель с применением SPH [15], лагранжева конечноэлементная модель с кинематическим импульсным возмущением [3]. Общим недостатком моделей является их фрагментарность или разорванность: в них не рассмотрены одновременно все составляющие технологической системы ЭГЭ (ПГП, жидкость и оснастка) во взаимодействии и в течение времени от начала развития ПГП до установления равновесного состояния.

Целью статьи является описание MMM активного и пассивного этапов ЭГЭ на основе подхода ALE, преодолевающей указанный недостаток (фрагментарность), и результатов моделирования, раскрывающих особенности поведения элементов и возможности подхода.

1. Описание модели

На рис. 1 показана схема модели, включающая в себя: 1- жесткий недеформируемый контейнер в форме параллелепипеда с внутренними размерами 100×105×105 мм (ширина×высота×глубина, показаны ребра), наполненный жидкостью (условно не показана), 2 – канал электрического разряда с размерами 50×1×1 мм, наполненный пароплазменной фазой. В дальнейшем канал разряда развивается в парогазовую полость.

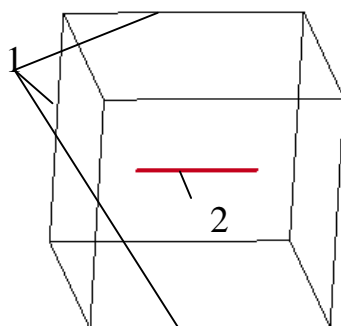


Рис. 1. Схема модели: 1 – ребра внутренности контейнера; 2 – канал разряда

Нестационарные механические процессы в системах сжимаемых сплошных жидких и газообразных сред определяются несколькими группами условий, имеющих вид равенств или неравенств. Ниже использованы три системы отсчета: эйлера неподвижная с координатами \mathbf{x} , лагранжева материальная с координатами \mathbf{X} и движущаяся по заданному закону референсная (вспомогательная) с координатами χ . Вводят материальную скорость

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

скорость переносного движения (скорость точки референсной системы отсчета)

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

и относительную скорость (скорость конвекции) точки в референсной системе отсчета

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

Уравнение движения (уравнение сохранения импульса) в подвижной референсной системе отсчета [12]

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

где ρ – плотность;

$\dot{\mathbf{x}}$ – вектор скорости эйлеровой сетки;

\mathbf{v} – вектор скорости материальной частицы;
 \mathbf{b} – массовая плотность внешних сил;
 $\boldsymbol{\sigma}$ – симметричный тензор напряжений Коши;
 ∇ – дифференциальный оператор набла.

Уравнение сохранения массы [12]

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

Уравнение баланса энергии [12]

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

где u – массовая плотность внутренней энергии;

$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{v} + \nabla^T\mathbf{v})$ – симметричный тензор скоростей деформации, слагаемое в правой части представляет собой мощность внутренних сил.

Приведенные формы законов сохранения позволяют ситуативно менять систему отсчета для вычисления левых частей уравнений, которые описывают 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.

Уравнение состояния пароплазменной фазы [10]

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

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 ПГП

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

где J – поток тепла (омические потери, определяемые в соответствии с [10]);

P, V – давление и объем ПГП, 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, относительного объема в канале разряда и выделением омического тепла постоянной скоростью.

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 или нелинейного уравнения Тэта [3]

$$P = P_0 + B \left((\rho/\rho_0)^n - 1 \right), \quad (10)$$

где P_0 – начальное давление;

$B = 304,7 \text{ МПа}$, $n = 7,15$ – коэффициенты.

Скорость девиатора напряжений в жидкой и пароплазменной фазах обусловлена вязкостью

$$\dot{S}_{ij} = v\Delta l a \rho \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (11)$$

где v – коэффициент динамической вязкости;

Δl – характерный размер;

a – скорость звука.

Полный тензор напряжений определяется как сумма шарового тензора и девиатора

$$\sigma = -P\mathbf{I} + \mathbf{S}, \quad (12)$$

где \mathbf{I} – единичный тензор.

Кавитация жидкости учитывается посредством ограничения растягивающего напряжения (давления кавитации)

$$P > P_c = -10^4 Pa. \quad (13)$$

Контактное взаимодействие описывается кинематическим условием непроницания

$$u''_{\xi} - u'_{\xi} \leq \Delta, \quad (14)$$

где Δ – величина зазора до деформации;

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

$$-\sigma'_{\xi}(\cos \alpha')^{-1} = -\sigma''_{\xi}(\cos \alpha'')^{-1} \leq 0, \quad (15)$$

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.

2. Точность методики

Прямая оценка точности невозможна ввиду отсутствия известных решений подобных моделей. Косвенная оценка проведена для двух случаев – начала процесса и асимптотического стационарного состояния системы.

Следует отметить сложный характер вычислений при решении задач. Анализируемые данные получены при использовании разнообразных алгоритмов в циклически повторяющемся порядке. Основной алгоритм – явный метод интегрирования по времени (метод центральных разностей). Часть переменных состояния вычисляют в узлах сетки, другую – в центрах элементов, при этом кроме эйлеровой сетки используют вспомогательную лагранжеву, вычисляемые значения переносят с одной сетки на другую в прямом и обратном порядке.

Дискретизация вносит свои погрешности, в особенности при аппроксимации контактных условий по методу штрафов. Для аппроксимации функций используют линейную интерполяцию. Наконец, вычисления проводятся процессором в режиме арифметики вещественных чисел с одинарной точностью (с округлением).

Вследствие перечисленных особенностей вычислительного процесса неизбежно возникают, накапливаются и множатся ошибки определения переменных состояния системы. В связи с этим оценка погрешности определения отдельных переменных состояния системы в отдельные моменты времени является характеристикой точности вычислительного процесса и методики в целом. Причем, чем

позже момент времени, тем большее количество промежуточных погрешностей учтено в значении анализируемой переменной.

Анализ точности проводят для базового варианта модели, начальное состояние которой характеризуется значениями параметров: относительный объем вещества ПГП $v_0=0,001$, объем ПГП $V_{r0}=5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$, внутренняя энергия на единицу объема ПГП при атмосферном давлении $E_0=5,12 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^3$, начальная скорость ПГП равна нулю, объем жидкости $V_{ж0}=1,10245 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, уравнение состояния жидкости вида (9), коэффициенты вязкости жидкости и вещества ПГП равны нулю. ПГП в начале процесса расположена в середине контейнера.

Вычисленное значение начального давления равно $1,3312 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ и совпадает с данными программы.

В равновесном состоянии системы выполняются условия сохранения полного объема системы и однородности давления. Решение соответствующих уравнений дает для асимптотического давления и объема ПГП величины $3,7668 \cdot 10^7 \text{ Па}$ и $1,767 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, соответственно.

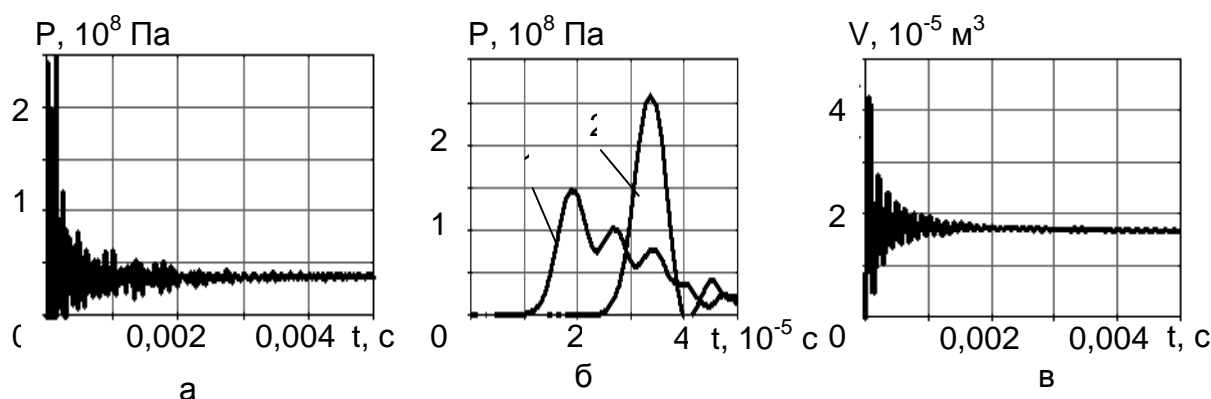


Рис. 2. Зависимость от времени параметров состояния ПГП: а – давление на передней грани; б – давление на левой и передней гранях; в – объем ПГП

На рис. 2 показаны расчетные зависимости от времени давления на границах жидкости (рис. 2, а) и объема ПГП (рис. 2, в), соответственно. Зависимости носят характер затухающих колебаний с асимптотическими значениями $3,8 \cdot 10^7 \text{ Па}$ и $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, соответственно. На рис. 2. б показана зависимость давлений в начале процесса; кривая 1 соответствует левой грани, 2 – правой верхней грани. Задержка роста значений объясняется конечной скоростью распространения волны давления. Оценка скорости распространения волны давления по времени задержки равна 1923 м/с, что превышает скорость звука.

Относительная ошибка значений давления на границе жидкости и контейнера, где жидкость будет действовать на твердые тела системы, равна 0,87%. Ошибка определения объема в конце периода – 3,79%. Отметим, что порядки величин давления и объема соответствуют приведенным в литературе [1, 2].

3. Результаты моделирования

Ниже проведен анализ зависимости основных параметров состояния элементов механической системы от времени, а также от свойств и значений харак-

теристик элементов. Общие характеристики показаны для базового варианта, затем даны характеристики вариантов, сравниваемых с базовым.

На рис. 3, а показана форма ПГП в исходном состоянии. Затем на рис. 3, б показан вид ПГП, когда ее объем достигает максимума, равного $4,29 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, что в 857,3 раза превышает первоначальный объем (стрелками показаны основные направления движения поверхности ПГП). Все размеры ПГП, как продольные, так и поперечные, увеличиваются, причем поперечное сечение принимает форму круга, несмотря на то, что первоначально имело квадратную форму. Развитие формы ПГП в незначительной степени зависит от первоначальной формы канала, что подчеркивается в эмпирических исследованиях ЭГЭ [10]. Важной для развития формы является наиболее общая черта – положение начала и конца канала. Эта ось сохраняет свою ориентацию вплоть до разрушения ПГП. Следом на рис. 3, в показано характерное изменение (уменьшение) размеров, причем поперечное сечение сохраняет форму круга, а в концах образуются хвостики большой кривизны. Вообще кривизна сильно меняется, образуются кольцевые участки отрицательной кривизны, которые интенсивно развиваются. Следует отметить, что изменение формы ПГП в значительной степени определяется не собственными параметрами ПГП, а действием окружающей жидкости, движение которой принимает характер течения, что подчеркивается в [10].

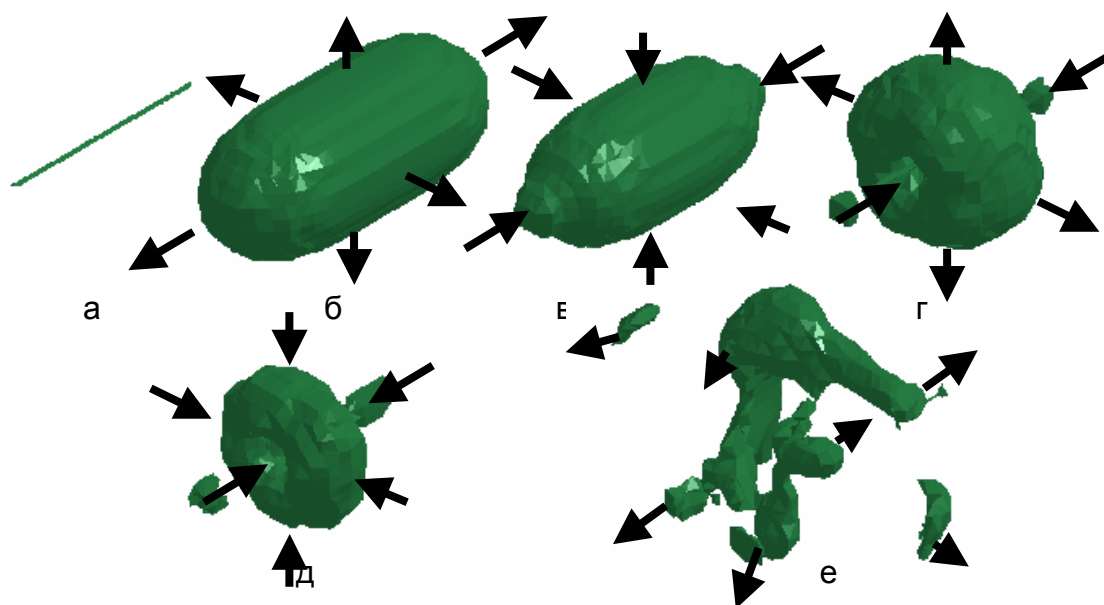


Рис. 3. Этапы формирования ПГП: а – $t = 0 \text{ с}$; б – $t = 6 \cdot 10^{-5} \text{ с}$; в – $t = 9,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$; г – $t = 1,95 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; д – $t = 2,85 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; е – $t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$

Для этапа, показанного на рис. 3, г, характерно образование сквозного канала вдоль оси ПГП под действием встречных течений и увеличения поперечных размеров, а также и разрыва хвостов на оси; ПГП становится неодносвязной.

На рис. 3, д показано уменьшение размеров и дальнейшее развитие осевого канала. Для этого этапа характерно начало разрушения осевой симметрии и вообще четкой структуры формы, своеобразная гидродинамическая неустойчивость, обусловленная взаимодействием течений жидкости в замкнутом объеме контейнера, в результате которой начинается хаотическое перемешивание. На последнем рис. 3, е показан этап фрагментации ПГП. ПГП разделяется течениями

жидкости на все большее количество фрагментов, имеющих случайную форму и двигающихся в разные стороны, увлекаемые течениями. Суммарный объем фрагментов с небольшими колебаниями имеет постоянную величину $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, что в 340 раз превышает первоначальный объем ПГП. Постоянство (неуничтожимость) остаточного объема ПГП объясняется тем, что в модели отсутствуют фазовые превращения (конденсация пара), характерные для реальных систем с ЭГЭ. Одновременно происходит выравнивание поля давления по объему.

По-видимому, образование ПГП сферической формы невозможно ввиду действия противоречивых факторов - течений жидкости. Наблюдаемые в эмпирических исследованиях [1, 2, 10] формы ПГП скорее близки к тору и лишь в силу скоротечности ошибочно характеризуются как сферические. Предположение сферической симметрии при решении соответствующих задач может быть неверным.

На рис. 4 показаны особенности поля давления в жидкости. Слева изобра

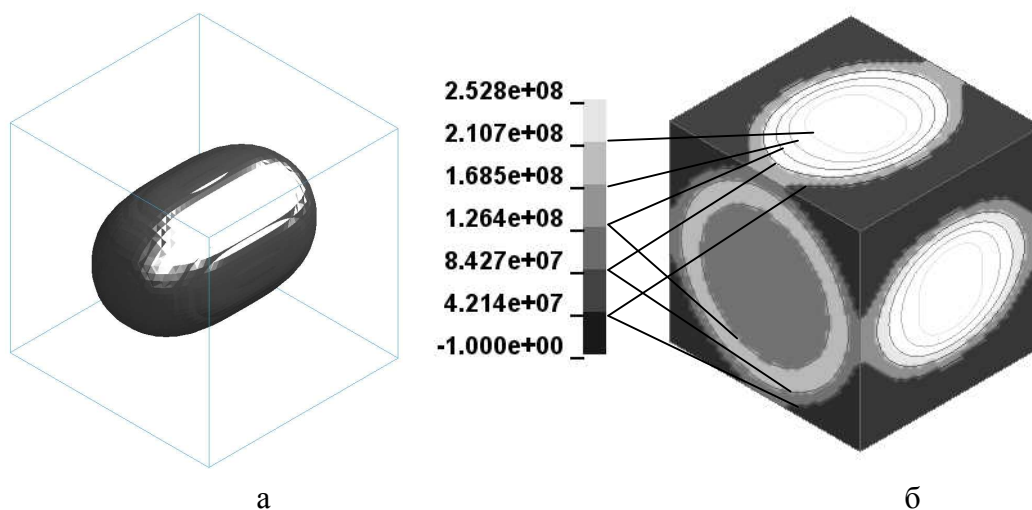


Рис. 4. Особенности поля давления в жидкости: а– фронт волны давления; б– выход волновых фронтов на грани

жена форма волны сжатия в момент, предшествующий выходу на грани объема. Форма представляет собой тело, близкое к эллипсоиду вращения. В работе [9] при дополнительных предположениях методом конформных отображений показано образование фронта в виде эллипсоида вращения при начальной цилиндрической форме. В данной работе первоначальная форма канала – параллелепипед.

Такое изменение первоначальной формы фронта происходит синхронно с изменением формы ПГП (рис.3, б). Оно также отмечено в эмпирических исследованиях [1, 2, 10] и является закономерностью гидродинамики жидкости при ЭГЭ.

Справа на рис. 4, б изображена структура поля давления на поверхности объема жидкости в момент времени $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ сразу после выхода фронта волны давления на поверхность контейнера. Линиями показано соответствие изобар и шкалы, размеченной в паскалях; черным тоном – невозмущенная зона.

Различие структуры полей давлений на левой грани и на верхней – правой гранях объясняется формой фронта волны давления (рис. 4, а). Первоначально волна приходит к левой грани (она расположена ближе к каналу), как показано на рис. 2, б (кривая 1). Ось эллипсоида перпендикулярна поверхности грани. Линии равных давлений на поверхности эллипсоида (фронте) и внутри его (в зоне возмущения) имеют кольцевую структуру с центрами на оси эллипсоида. Картина на

левой грани является нормальным сечением этого эллипсоида и обнаруживает его. Структура распределения давлений на грани имеет вид круговых колец. Величина давления в центре ниже, чем на периферии, что связано с положением фронта как раз на периферии; внутри кольца волна уже отразилась вовнутрь.

Как следует из рис. 2, а и рис. 2, б поле давлений носит, в основном характер затухающих колебаний, связанный с колебаниями ПГП, показанными на рис. 2, в. Величина максимального давления волны на левой границе – $1,4 \cdot 10^8$ Па, а на правой (и верхней) грани – $2,5 \cdot 10^8$ Па. Разница объясняется различной ориентацией канала как излучающей антенны по отношению к граням; действие электрического разряда зависит от дистанции и от ориентации площадки, воспринимающей действие. Для левой грани излучатель носит характер точечного источника, в то время как для правой грани – протяженного источника и сигнал от антенны интегрируется по ее длине. К моменту окончания счета (5 мс) давление становится практически однородным, колебания давления не превосходят 3%.

Вещество ПГП в течение процесса сильно меняет свою плотность и в связи с этим – свойства, выражаемые вязкостью. Рассмотрена зависимость решений от значения коэффициента вязкости, который менялся на трех уровнях – 0, 0,05 и 0,075 1/с. Изменения характеризовались четырьмя параметрами, два из которых характеризуют поведение ПГП как источника возмущения (максимальный объем и асимптотическое значение объема), два других – поведение жидкости на границе, где она воздействует на заготовку (максимальное и асимптотическое значение давления). Кроме того, асимптотические значения являются основой для оценки точности решения.

Величина ошибки максимального давления равна 5,7 % и является наибольшей в сравнении с ошибкой определения максимального объема ПГП (равной 0,03%) и прочими ошибками, равными нулю, что объясняется изменением скорости роста объема. В целом изменение параметров как возмущения, так и жидкости невелики. При использовании вязкости газа в качестве средства борьбы с вычислительной неустойчивостью ошибки решения будут незначительными.

Первоначально вещество канала находится в сильно сжатом состоянии. Величина относительного объема $v_0 = V_2|_{t=0}/V_{20}$, где $V_{20}, V_2|_{t=0}$ – объем газа при нормальных условиях и в начальный момент времени весьма мала, а начальное давление вещества канала, наоборот, велико. Начальное давление является мощным фактором совершения работы над окружающей жидкостью. Наряду с базовым вариантом для сравнения рассмотрен вариант, в котором величина начального относительного объема равна единице, т. е. вещество не сжато, начальное давление отсутствует.

Как и ожидалось, максимальное давление значительно (в 1,64 раза) меньше, асимптотическое давление в 1,73 раза меньше, максимальный объем ПГП в 1,72 раза меньше, окончательный объем ПГП в 1,79 раза меньше, чем в базовом варианте. Без учета начального давления все значения составляют 56...61% в базовом варианте. Неучет начального сжатия (давления) является методической ошибкой.

Наряду с базовым вариантом рассмотрены варианты с нулевым и с пониженным начальным значением энергии, равным 10^7 Дж/м³. Величины давления в сравнимом с базовым варианте случае равны нулю, а объем ПГП неизменен. Эти особенности объясняются линейной зависимостью давления от начальной энергии в уравнении состояния идеального газа (7). Внутренняя энергия идеального газа пропорциональна абсолютной температуре, которая в данном случае равна

нулю. Уменьшение параметров непропорционально уменьшению начального значения внутренней энергии.

Очевидно, начальное давление и начальная внутренняя энергия по-разному влияют на кинетику процесса, при решении задач необходимо обоснованно (адекватно) назначать величины этих параметров.

Рассмотрен вариант, когда от вещества ПГП отбиралось тепло со скоростью $0,373 \cdot 10^{12}$ Дж/с м^3 , за 30 мкс, следовательно, конечное количество внутренней энергии стремилось к нулю (модель конденсации пара). В этом случае асимптотическое давление и объем ПГП ожидаемо уменьшились в 400 и 150 раз в сравнении с базовым вариантом, соответственно.

Сравнение базового варианта с вариантом, использующим уравнение состояния Тэта для воды, показало, что в последнем варианте жидкость более «жесткая», асимптотическое давление выше (43 МПа против 39 МПа), а остаточный объем ПГП ниже ($1,57 \cdot 10^{-5}$ м^3 против $1,7 \cdot 10^{-5}$ м^3).

Сравнение базового варианта с вариантом, в котором поверхность ПГП движется со скоростью 100 м/с, ожидаемо дало несколько большие значения максимальных давлений (138, 6 МПа против 129 МПа), но при этом сохранило асимптотические значения давлений и объема ПГП.

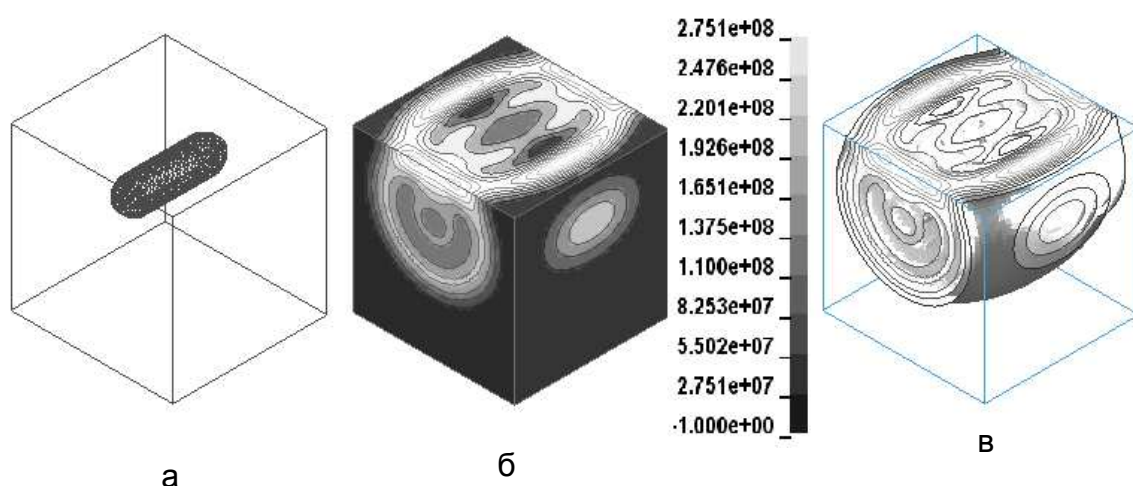


Рис. 5. Особенности поля давления при смещенном канале разряда

На рис. 5 показаны особенности поля давления при смещении начального положения канала разряда вверх в момент времени $3 \cdot 10^{-5}$ с. На рис. 5, а показано положение и форма ПГП. ПГП имеет осесимметричную округлую в поперечном сечении продолговатую форму. Отраженные от поверхностей контейнера волны еще не влияют на форму ПГП.

На рис. 5, б изображена структура поля давления на поверхности объема жидкости в виде изобар. Темным тоном показана невозмущенная зона. В отличие от рис. 4 картины давлений на передней и верхней гранях различаются. На нижней грани давления отсутствуют. Максимальные давления на передней грани находятся в центре (в середине), в то время как на верхней и левой гранях максимальные давления смещены к периферии. Картина распределения давлений на левой грани имеет незаконченную простую круговую структуру, в то время как на верхней поверхности картина имеет очень сложную структуру.

Описанные особенности объясняются структурой поля давления, показанного на рис. 5, в виде изоповерхностей давления. Видно, что на границе возмущенной зоны фронт имеет бочкообразную форму, а описанные особенности возникают как сечения. Искажения формы фронта и структуры внутри объясняются отражением и интерференцией волн.

Структуры поля давления, полученные расчетным путем, обладают ожидаемой симметрией, что было бы невозможно при низкой точности решений основополагающих уравнений модели.

ПГП, показанная на рис. 5, а, вначале сохраняет свое положение, затем движется вниз, а в конце периода счета – вверх, что объясняется действием отраженных волн сначала от верхней грани, а затем – от нижней. Кроме того, в конце моделируемого процесса образуется восходящий поток жидкости, он также увлекает ПГП вверх.

Выводы

Представлена новая вычислительная механико-математическая модель ЭГЭ, включающая в себя взаимодействующие ПГП, жидкость и камеру, и позволяющая исследовать процессы в механической системе непрерывно на активном и пассивном этапах при воздействии на технологический объект. Модель пригодна для учета взаимодействия ПГП и стенок камеры, имеющей конечный объем и произвольную форму. Канал разряда может иметь достаточно произвольную начальную форму и расположение относительно стенок камеры. Возмущение в системе создается за счет начальных внутренней энергии и сжатия (начальной энтальпии) вещества канала разряда, а также потока тепла внутрь ПГП. Зависимость потока тепла от времени и электрофизических параметров разрядного контура может быть определена в соответствии с [2,3]. Обратный фазовый переход (конденсация) вещества ПГП и его механический эффект могут быть учтены стоком тепла.

Выполнена оценка точности решения определяющих выражений модели в конце периода вычислений; ошибка давления на границе объема жидкости составляет 0,87%, а объема ПГП – 3,79%.

Количественные и качественные характеристики полей давлений и скоростей соответствуют наблюдаемым на практике или сформулированным в результате анализа. Наблюдаются волновой, колебательный и квазистационарный этапы развития полей давлений и скоростей, которые произвольно сменяют друг друга. Расчетным путем подтверждена независимость формы ПГП от начальной формы канала разряда, а также эллиптичность фронта волны давления. Зависимость функций состояния от значений параметров модели носит прогнозный характер. В целом можно сделать вывод об адекватности модели.

Модель предназначена для моделирования технологических систем, использующих ЭГЭ, например электрогидравлической штамповки в целях оптимизации техпроцесса и повышения качества изделия, а также для анализа напряженно-деформированного состояния и прочности оснастки, например электродов.

Список литературы

1. Поздеев, В.А. Прикладная гидродинамика электрического разряда в жидкости [Текст]/ В.А. Поздеев.– К.: Наук. думка, 1980. – 190 с.

2. Бескаравайный, Н.М. Высоковольтный разряд в замкнутых камерах малого объема [Текст]/ Н.М. Бескаравайный // Теория, эксперимент, практика электро-разрядных процессов. – К.: Наук. думка, 1992. – С. 53-57.
3. Мамутов, В.С. Теория обработки материалов давлением. Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки [Текст]/ В.С. Мамутов, А.В. Мамутов. –СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 188 с.
4. Тараненко, М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы [Текст]/ М.Е. Тараненко.- Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 272 с.
5. Диффузионная сварка труб с трубной решеткой с использованием давления электровзрыва [Текст]/ В.С. Опара, Л.Ю. Демиденко, Е.С. Юрченко и др. // Теория, эксперимент, практика электроразрядных процессов. – К.: Наук. думка, 1992. – С. 90-97.
6. Бутаков, Б.И. Уточненная модель электрогидроимпульсного воздействия на формирующийся слиток [Текст]/ Б.И. Бутаков, В.А. Ульянов// Теория, эксперимент, практика электроразрядных процессов. – К.: Наук. думка, 1992. – С. 99-104.
7. Вулых, Н. В. Восстановление деталей типа втулок электрогидроимпульсной обработкой [Текст]/ Н.В. Вулых// Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. – 2010. – №6 (46). – С. 25-28.
8. Вилков, К. В. Комплексная расчетно-теоретическая методика моделирования процессов, сопровождающих импульсное энерговыделение в конденсированных средах: дис. ...канд.физ.-мат. наук: 01.02.05/ Вилков Константин Владимирович.– М., 2004.– 132 с.
9. Гимадеев, М. М. Совершенствование методики расчета энергетических параметров ударной волны при высоковольтном электрическом разряде в воде на основе теплофизического подхода: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14/ Гимадеев Минахмет Минхайдарович.– Набережные Челны, 2009.– 130 с.
10. Мазуровский, Б.Я. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке [Текст]/ Б.Я. Мазуровский, А.Н. Сизев. – К.: Наук. думка, 1983. – 192с.
11. Fluid Structure Interaction II. Modelling, Simulation, Optimization/ Ed. H.-J. Bungartz, M. Mehl, M. Schafer. – Springer, 2010. – 424 p.
12. 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
13. LS-DYNA. Keyword user's manual. Version 971. – Livermore: LSTC, 2006.– 2102 p.
14. Сулимов, Б. К. Динамика электровзрывной каверны в жидкости в поле внешнего переменного давления: дис. ... канд. техн. наук. 05.14.12 / Сулимов Борис Константинович.– Караганда, 1998.– 160 с.
15. Нарыжный, А.Г. Вычислительная компьютерная модель электрогидравлической листовой штамповки [Текст]/ А.Г. Нарыжный, М.Е. Тараненко// Обработка металлов давлением: сб. науч. тр. Донбас. гос. машиностроит. акад. – №1 (26). – Краматорск, 2011. – С. 34-40.

Рецензент: докт. техн. наук, профессор Тараненко М.Е., Национальный аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

Поступила в редакцию 10.04.12

Обчислювальна модель електрогідравлічного ефекту

Описано механіко-математичну модель електрогідравлічного ефекту в механічній системі в складі парогазової порожнини, технологічної рідини та жорсткої розрядної камери. Парогазова порожнина отримує збурення у вигляді початкового тиску, внутрішньої енергії та потоку тепла. Використано змішаний підхід ALE. Наведено результати моделювання, які кількісно відображують особливості поведінки елементів механічної системи. Подано також картини зміни форми парогазової порожнини, особливості хвильових полів тиску в рідині.

Ключові слова: електрогідравлічний ефект, гідродинаміка, моделювання, ALE

Computing model of electro-hydraulic effect

The article contains the description of a mechanical -mathematical model of electro- hydraulic effect in mechanical system, including vapour-gas cavity, technological liquid and rigid camera. The vapour- gas cavity gets the perturbation in the manner of initial pressure, internal energy and the heat flow. The mixed approach ALE is used. The broughted results of simulation, quantitative reflecting particularities of the behaviour of mechanical system elements. The represented pictures of the changing form of the vapour- gas cavity, particularities by wave field of the liquid pressure.

Keywords: electro- hydraulic effect, hydrodynamics, simulation, ALE.