

На правах рукописи

**ШТИФАНОВ АНДРЕЙ ИВАНОВИЧ**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ЖИДКОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДАХ  
И ДЕТОНАЦИЯХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ**

Специальность 05.13.16 – Применение вычислительной техники,  
математического моделирования и  
математических методов в научных  
исследованиях (энергетическое машиностроение )

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Белгород - 1998

Работа выполнена на кафедре автоматики Белгородской государственной технологической академии строительных материалов

Научный руководитель – кандидат технических наук,  
доцент Потапенко А. Н.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,  
профессор Дмитриенко В.Д.  
кандидат технических наук  
Васильев П.В.

Ведущая организация – государственное унитарное предприятие  
"Завод имени В.Я.Климова", г. Санкт-Петербург.

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1998 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета К 064.66.04 в Белгородской государственной технологической  
академии строительных материалов (БелГТАСМ) по адресу :  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, аудитория 242

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БелГТАСМ.

Отзывы на автореферат и замечания (в двух экземплярах), заверенные печатью просим  
направлять по адресу :  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БелГТАСМ, отдел аспирантуры.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1998 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент

Синюк В.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** обусловлена следующими причинами.

Для изготовления мелкосерийных листовых деталей в изделиях энергетического и химического машиностроения, автомобильной, авиационно-космической и других отраслей промышленности применяется импульсное оборудование, в том числе электрогидравлическое и газодетонационное. Существенным фактором, препятствующим широкому применению данного вида оборудования, является недостаточная теоретическая изученность основных динамических процессов, возникающих под действием импульсных источников энергии. Без расчета картины происходящих динамических процессов в жидкости под действием импульсного источника довольно сложно дать правильную интерпретацию полученным экспериментальным результатам, а также определить гидродинамическое поле давлений для оценки внешней нагрузки при обработке материалов. Кроме того, отсутствует математическая модель для исследования неоднородных и нестационарных процессов, протекающих синхронно в нескольких камерах многоэлектродных разрядных блоков (МРБ). Применяемая полуэмпирическая модель райчета поля давления на преграде\* имеет существенные ограничения и не объясняет физику протекающих процессов. Также следует отметить, что существующая модель для исследования динамических процессов при взрыве газового заряда [1-5], дает сглаженные эпюры давлений, причем в расчетах не учитывается энергия ударной волны, а учитываются волновые процессы от расширяющихся продуктов детонации.

Таким образом, актуальность диссертационной работы вытекает из практической необходимости разработки и применения математической модели для детального описания исследуемых нестационарных и неоднородных гидродинамических процессов и их наглядной физической интерпретации. Также, существует потребность в обеспечении автоматизированных рабочих мест (АРМ) конструктора и технолога методами, алгоритмами и программными продуктами для проектирования импульсного оборудования и разработки новых технологических процессов.

**Цель работы.** Разработка математической модели, алгоритмов и пакета прикладных программ для исследования многомерных волновых процессов, протекающих в ограниченном объеме жидкости, при электроразрядах и методики учета влияния ударной волны на динамические процессы при детонации горючей газовой смеси, а также формулировка практических рекомендаций для исследуемых импульсных способов обработки материалов давлением.

### **Научная новизна.**

1. Разработана математическая модель для исследования многомерных волновых процессов, протекающих в ограниченном объеме жидкости и возникающих при электроразряде.

---

\* Борисевич В.К., Мовшович И.Я., Чебанов Ю.И., Голованова М.А., Князев М.К. Построение расчетных моделей полей нагружения установки ЭГШ на основе эмпирических аппроксимаций // Кузнечно-штамповочное производство. 1997. №9. С.20-23.

2. Разработана методика расчета, позволяющая учитывать влияние ударной волны исследуемые динамические процессы при взрыве газового заряда.

3. Разработана дискретная двухуровневая модель, позволяющая автоматизировать процесс построения геометрической конфигурации модели с заданием исходных граничных условий.

4. Выполнена модификация численного метода решения системы разностных уравнений, построенных по явной трехслойной схеме, позволяющая уменьшить требуемый объем оперативной памяти ЭВМ.

5. На основе математического моделирования выявлены диапазоны соотношений размеров разрядной камеры и параметров импульсного источника, при которых существует эффект асимметричной концентрации энергии на преграде.

6. Установлена возможность физической интерпретации экспериментальных результатов на основе численных расчетов.

#### **Основные научные результаты:**

1. Математическое моделирование позволило дать теоретическое обоснование экспериментально установленному эффекту асимметричной концентрации энергии относительно центральной линии разрядной камеры при высоковольтном разряде.

2. Определена возможность концентрации энергии при синхронном высоковольтном разряде в нескольких камерах МРБ с учетом заданной ориентации каналов разряда в пространстве.

3. Моделирование электрических полей позволило выявить то, что максимальная концентрация напряженности поля возникает в случае применения одного изолированного электрода, а другого не изолированного со значительно большей поверхностью.

4. Подтверждено, что основная энергия взрыва газового заряда в удлиненных цилиндрических камерах сосредоточена в продуктах детонации, а не в ударной волне.

#### **Практическая ценность работы.**

1. Разработаны алгоритмы и пакет прикладных программ для АРМ технолога и конструктора импульсного оборудования.

2. Разработан алгоритм решения дифференциальных уравнений гиперболического типа, аппроксимированных по явной трехслойной схеме, позволяющий сократить используемый объем оперативной памяти ЭВМ.

3. Разработана методика расчета межэлектродного канала пробоя в жидкости для ЭГИУ с учетом возможности выбора рациональных форм электродов.

4. Разработан алгоритм построения геометрической конфигурации модели с заданием граничных и начальных условий.

5. Сформулированы практические рекомендации для эффективного использования ЭГИУ:

- определены диапазоны изменения относительных величин камер МРБ с учетом эффекта асимметричной концентрации энергии при электроразряде;
- рекомендовано контролировать синхронизацию разрядов в камерах МРБ;

- выделены основные факторы, от которых зависят процессы обработки материалов с помощью МРБ;

- рекомендовано для малоинерционных процессов определение поля давления по поверхности обрабатываемой заготовки с помощью разработанной методики без учета подвижности заготовки.

6. Основные результаты работы используются в учебном процессе на кафедре ПО ВТАС при чтении курса "Математическое моделирование технологического оборудования" (специальность 22.04), а также при проведении научно-исследовательских работ, курсового проектирования.

**Положения работы, выносимые на защиту:**

- Математическая модель, описывающая динамические процессы в жидкости, возникающие при электроразряде.

- Методика расчета, позволяющая учитывать влияние ударной волны на исследуемые динамические процессы при взрыве газового заряда.

- Дискретная двухуровневая модель.

- Модификация численного метода решения системы разностных уравнений, построенных по явной трехслойной схеме.

- Алгоритмы и пакет прикладных программ для исследования волновых процессов при электроразрядах и детонациях газовых смесей в жидкости.

- Результаты численных расчетов, позволяющие детально описать нестационарные и неоднородные гидродинамические процессы, протекающие в жидкости при электроразряде и взрыве газового заряда, и дать их наглядную физическую интерпретацию.

**Апробация работы.** Результаты работы, связанные с математической моделью волновых процессов в ЭГИУ были представлены на следующих научно-технических конференциях, конгрессах и семинарах:

- X Международной школе-семинаре "Перспективные системы управления на железнодорожном, промышленном и городском транспорте" (Алушта, 1996, 1997);

- международной конференции "Промышленность стройматериалов и стройиндустрия, энерго- и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений" (Белгород, 1997);

- научном семинаре кафедры машины и технологии обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного технического университета (Санкт-Петербург, 1997);

- научных семинарах кафедр автоматики и программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем БелГТАСМ (Белгород, 1995-1997).

Результаты работы, связанные с математической моделью динамических процессов в ГДУ, представлены в соавторстве на международном конгрессе World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Materials (Вашингтон, 1996);

### **Связь с научно-техническими программами и международными организациями.**

1. Результаты диссертационной работы, связанные с разработкой алгоритмов и пакета прикладных программ, вошли в заключительные отчеты по следующим программам:

- госбюджетная тема по разработке импульсного оборудования для высокоэнергетического воздействия на свойства материалов с автоматизацией объекта управления (приказ №347 от 23.05.1990 г.) – параграфы 2.2, 2.4, 2.6, 2.7;
- научно-техническая программа "Конверсия и высокие технологии. 1994-1996 гг." (код проекта 62-1-5 "Импульс-ПМ") – параграфы 2.1, 2.2.

2. Разработанная модель, алгоритмы и пакет прикладных программ используются в работе по научно-технической программе "Конверсия и высокие технологии. 1997-2000 гг." (код проекта 5-1-1 "Взрыв-01").

3. Автор диссертационной работы с 1997 года является членом международной ассоциации по порошковой металлургии APMI International (США). Удостоверение №18606ASF.

**Публикации.** Основные положения изложены в 15 печатных работах и в 2 рукописных работах (заключительные отчеты по НИР). Осуществлена регистрация программы моделирования "ИМПУЛЬС" в Российском агентстве по правовой охране программ и баз данных (свидетельство №980135).

**Объем и структура диссертации.** Общий объем диссертации составляет 235 страниц и включает:

- введение, четыре главы, заключение, изложенных на 148 страницах;
- рисунков 77 на 39 страницах;
- список литературы из 170 наименований на 15 страницах;
- приложений 4 на 34 страницах, включающих 34 рисунка.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и задачи исследования, изложена научная новизна и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** отмечены преимущества импульсных методов обработки материалов и проанализированы особенности существующих схем электрогидроимпульсного и газодетонационного оборудования, а именно, мобильность, простота и низкая стоимость, а также возможность полной автоматизации.

Рассмотрена физическая картина волновых взаимодействий в электрогидроимпульсных и газодетонационных установках. Отмечено, что правильная оценка эмпирических зависимостей, аппроксимирующих результаты экспериментальных исследований гидродинамических полей давлений на преградах возможна только в результате расчета протекающих процессов.

Приведен анализ имеющихся методик расчета гидродинамических процессов. Сделан вывод о том, что для исследования неоднородных и нестационарных процессов, протекающих одновременно в нескольких камерах МРБ, ранее не существовало математических моделей для анализа возможности концентрации энергии при высоковольтном разряде в камерах МРБ с учетом заданной ориентации каналов разряда в пространстве камер. Применяемая полуэмпирическая модель для расчета поля давления на преграде имеет существенные ограничения и не объясняет физику протекающих процессов.

Выполнен сопоставительный анализ существующих методов и моделей для решения прикладных задач, связанных со взрывом газового заряда в жидкости. Кратко дано описание математической модели для исследования динамических процессов при взрыве газового заряда [1-5]. Отмечено, что данная модель дает сглаженные эпюры давлений, причем в расчетах не учитывается энергия ударной волны.

Проведен обзор численных методов, используемых для решения для решения дифференциальных уравнений в частных производных. Показано, что наиболее универсальным и широко распространенным методом для решения линейных и нелинейных дифференциальных уравнений гиперболического, эллиптического и параболического типов является метод конечных разностей.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели для исследования динамических процессов с учетом ударных волн, протекающих в ограниченном объеме жидкой передающей среды и образующихся в результате высоковольтного разряда (рис. 1,а).

Показано, что физический процесс при электроразряде можно разбить на отдельные этапы и свести моделирование к исследованию каждого этапа на основе некоторых систем уравнений [8].

На первом этапе при электроразряде происходит образование канала пробоя  $V_e(t)$  в исследуемой области  $A_e(t)$ . На основе расчета электрического поля определяется граница  $V_e(t)$  как линия с максимальными значениями напряженности электрического поля  $E$  между электродами  $\Gamma_7$  в  $\Gamma_8$ . Для определения параметров электрического поля используется дифференциальное уравнение Пуассона, выражающее взаимосвязь между полем и зарядами через понятие электрического потенциала  $\xi$ . В области поля, где нет зарядов уравнение Пуассона переходит в уравнение Лапласа.

На втором этапе процессы, протекающие в жидкости определяются импульсным источником  $V_e(t)$ , образовавшемся в результате пробоя межэлектродного промежутка в виде разрядного канала с высоким давлением. Изменение давления в источнике  $V_e(t)$  приводит к появлению ударных волн в области  $A_e(t)$  и к волновым процессам. В связи с этим, при моделировании учтена многомерность задачи и расчет выполняется по неоднородному волновому уравнению в трехмерной декартовой системе координат.

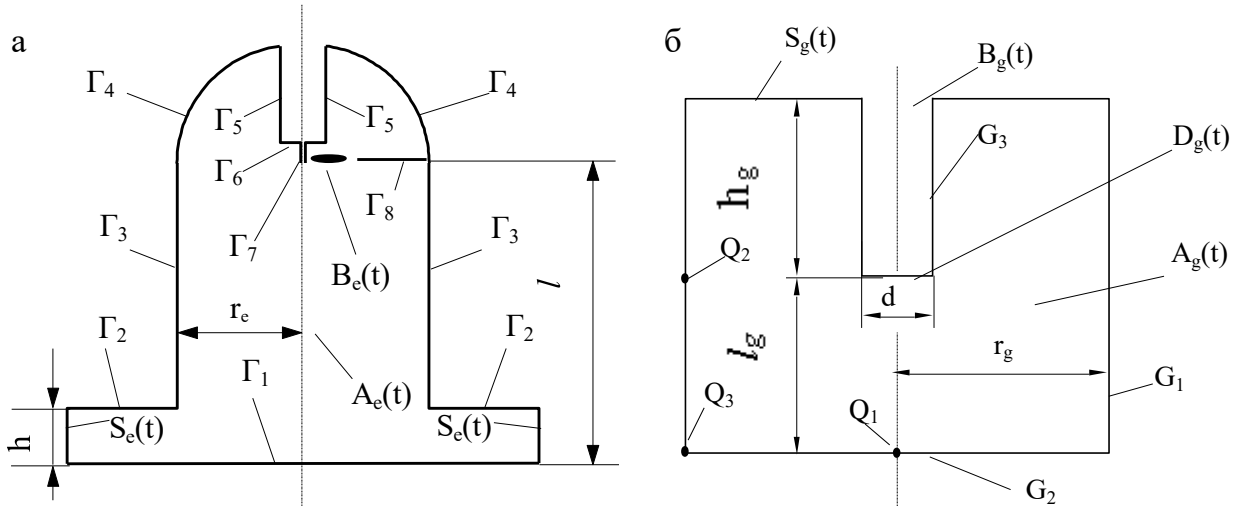


Рис. 1. Схемы моделирования разрядной камеры (а) и процесса взрыва газового заряда (б) в жидкости:  $A_e(t)$ ,  $A_g(t)$  – области жидкой передающей среды;  $B_e(t)$ ,  $B_g(t)$  – импульсные источники;  $D_g(t)$  – граница раздела "продукты детонации-жидкость";  $S_g(t)$  – свободная поверхность жидкости;  $S_e(t)$  – граница симметрии;  $\Gamma_1 \dots \Gamma_6$ ,  $G_1 \dots G_3$  – жесткие границы;  $\Gamma_7$  – центральный изолированный электрод;  $\Gamma_8$  – неизолированный электрод (стержень-токовод), связанный с корпусом разрядной камеры;  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  – параметры среды в особых точках

На третьем этапе исследуется расширение парогазовой полости, образовавшейся в жидкости в результате пробоя межэлектродного промежутка. При этом применяется модель идеальной несжимаемой жидкости в виде уравнений Пуассона и Лапласа с учетом кинематических и динамических условий на подвижных границах исследуемой области  $A_e(t)$ .

На заключительном этапе определяется величина перемещения жидкости в газе. Используется обыкновенное дифференциальное уравнение 1-го порядка, нелинейное, учитывающее движение единичного слоя жидкости, силы сопротивления и тяжести. Расчет взаимодействия жидкости с преградой выполняется по формуле одномерного гидравлического удара.

В данной главе приводится методика учета влияния ударной волны на гидродинамические процессы при детонации горючей газовой смеси в цилиндрической камере, частично заглубленной в жидкость. Методика разработана для модели, представленной в [1-3] и детально рассмотренной в диссертационной работе А.Эль-Хаммудани\*.

В начале первого этапа модели [1-3] определяются параметры импульсного источника  $B_g(t)$  на границе раздела "продукты детонации - жидкость"  $D_g(t)$ . Нововедением является то, что в расчетах учитывается выход головной части детонационной волны в жидкость в виде ударной волны. По известному давлению на границе  $D_g(t)$  решается неоднородное волновое уравнение, причем отдельно для ударной волны при измене-

\* Эль-Хаммудани А. Моделирование динамических процессов в ограниченном объеме гидросреды при взрыве газового заряда: Дис. ... канд. техн. наук: БелГТАСМ, Белгород, 1997. - 199 с.



нии давления на  $D_g(t)$  по известному экспоненциальному закону  $P_{g1}(t)$  и для высокоскоростного расширения газовой полости по колоколообразному закону  $P_{g2}(t)$ .

В выводах отмечается, что разработанная математическая модель [8] в отличие от аналогичной модели [1-5], принятой за прототип, позволяет определять границы канала пробоя в жидкости и исследовать в рамках модели идеальной сжимаемой жидкости особенности волновых процессов в жидкости с учетом ударных волн. В связи с тем, что в разработанной модели имеются существенные отличия в расчете волновых процессов на начальных этапах, поэтому имеются отличия от прототипа и в решении задачи в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости. На заключительном этапе в отличие от прототипа учитывается изменение исходной массы жидкости при торможении ее в воздухе.

**Третья глава** посвящена разработке дискретной двухуровневой модели и алгоритмам расчета гидродинамических параметров жидкости при электроразряде и взрыве газового заряда [8-10].

Представленные краевые задачи решены одним из наиболее универсальных и эффективных методов – методом конечных разностей. В основу положена идея замены системы дифференциальных операторов континуальной краевой задачи их разностными аналогами. Область непрерывного аргумента  $A(t)$  представлена конечным дискретным множеством точек  $\omega_{th}$  (для волнового уравнения) и  $\omega_h$  (для уравнения Лапласа) с выделением внутренних и граничных узлов. Волновое уравнение и уравнение Лапласа записаны относительно потенциала скоростей в трехмерной декартовой системе координат.

Выполнена модификация метода конечных разностей путем представления исследуемой области жидкости в виде двухуровневой сетки. Основные принципы, положенные в разработанную двухуровневую сеточную модель: сетка является равномерной по всем осям координат; все граничные узлы являются регулярными по всем осям координат; сетка является связной; нововведением является разделение сетки на два уровня (рис. 2): на первом уровне хранятся значения искомой сеточной функции на трех временных слоях, а на втором – признаки расположения узла, а именно, основные (физические) признаки расположения узла (внутри, вне или на границе расчетной области, если узел лежит на границе, то конкретизируется тип границы: жесткая, подвижная, граница источника и т.п.) и вспомогательные (геометрические) признаки расположения границы относительно центра расчетной области.

Для волнового уравнения представлены следующие трехслойные разностные схемы по временному параметру, а по координатам с использованием центральных разностей: явная схема, схема Дюфорта-Франкела, неявная схемы и модифицированные явные схемы.

Уравнение Лапласа представлено в неявной форме с учетом использования метода Либмана с ускоряющим множителем для оптимизации итерационного процесса.

В операторной форме представлены дифференциальные краевые задачи для каждого этапа расчета. На жестких поверхностях радиальная скорость жидкости равна ну-

лю, в связи с этим, использовалась однослойная аппроксимация  $\psi$  и односторонняя трехточечная аппроксимация по координате. На границах свободной поверхности  $\partial\psi/\partial t=0$ , поэтому использовалась центральная разность по времени. По оси симметрии – симметричная пятиточечная аппроксимация  $\psi$  по координате. На границах источников представлена потенциальная функция источника в точном виде.

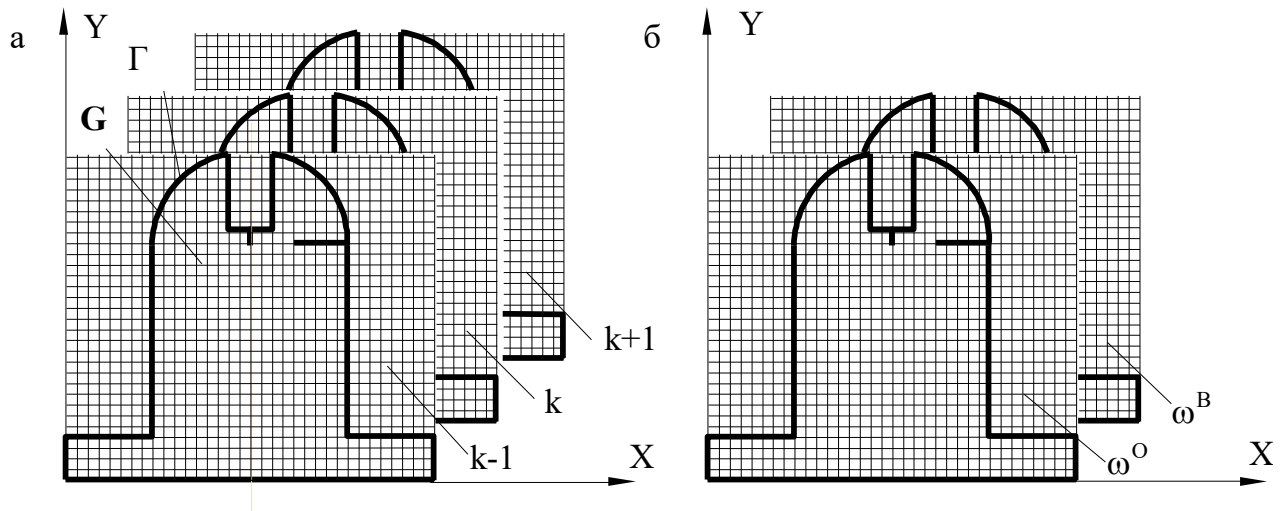


Рис. 2. Двухуровневая сеточная модель: а – 1-й уровень, состоящий из 3-х временных слоев; б – 2-й уровень, состоящий из двух слоев признаков расположения узлов

В главе приведен алгоритм общего расчета гидродинамических параметров жидкости, а также алгоритмы и структурограммы численного расчета волнового уравнения и уравнения Лапласа для плоской и объемной моделей, базирующиеся на двухуровневой сеточной модели. Особенность алгоритмов заключается в том, они позволяют выполнять расчет областей с геометрией границ, включающей отрезки, дуги и окружности. Кроме того, двухуровневая сеточная модель позволяет автоматизировать процесс построения границ технологического объекта и задание исходных граничных условий и начальных данных.

Приведен алгоритм, модифицирующий численный метод решения системы разностных уравнений, построенных по явной трехслойной схеме. Суть алгоритма заключается в использовании при расчете двух временных слоев, а именно, в процессе расчета значений сеточной функции на  $(k+1)$ -ом слое полученные значения записываются в  $(k-1)$ -й слой. Данный алгоритм позволяет сократить требуемый объем оперативной памяти, что является актуальным при моделировании трехмерных краевых задач с количеством узлов в несколько сот тысяч.

В главе представлена спроектированная объектно-ориентированная структура программы моделирования, базирующаяся на иерархической системе классов и объектов и оптимизация алгоритмов и структур данных программы моделирования, позволяющая вдвое сократить требуемый объем оперативной памяти. Программное обеспече-

ние математической модели написано на языке C++ для операционной системы Windows.

**Четвертая глава** посвящена исследованию с помощью математического моделирования основных закономерностей формирования поля давлений на преграде в условиях нагружения многоэлектродным разрядным блоком, а также динамических процессов в гидросреде, образующихся при взрыве газового заряда, с учетом ударных волн.

Анализ разностных схем показал, что решение волнового уравнения с помощью явной симметричной трехслойной разностной схемы с учетом условия устойчивости дает качественное согласие экспериментальных данных и результатов расчета. Применение схемы Дюфорта-Франкела, обладающей безусловной устойчивостью, может с успехом использоваться в процессах, где необходимо быстро получить качественное и количественное решение с некоторой погрешностью.

В главе приводятся результаты влияния шага по координате  $h$  и шага по времени  $\tau$  на погрешность расчетов при расчете по явной разностной схеме и схеме Дюфорта - Франкела. Для схемы Дюфорта-Франкела при уменьшении  $\tau$  более чем в 10 раз время достижения максимального давления на преграде изменяется при этом на 58%. Для расчетов по явной схеме аналогичная погрешность расчета составляет всего 1,8%. Изменении шага по координате  $h$  на порядок приводит к погрешности расчета давления по явной схеме до 5%. В связи с этим, дальнейшие расчеты проводились только по явной схеме.

Для представления характерных параметров исследуемого процесса и геометрических размеров камер в безразмерных величинах за базовые величины были выбраны  $\tau_0$ ,  $P_m$ ,  $d_0/2$  и  $U_1$ , где  $\tau_0$  и  $P_m$  – параметры импульсного источника  $V_e(t)$ ;  $d_0$  – диаметр камеры разрядного блока,  $U_1$  – максимальная разность потенциалов между электродами

Сравнительный анализ результатов расчета по плоской и объемной модели показал, что несмотря на то, что объемная модель дает более точный количественный результат и является более информативной (результат просматривается в трех плоскостях) можно использовать плоскую модель. Это связано с тем, что расчеты по плоской модели дают правильный качественный результат, а это является более важным для наглядной интерпретации физической картины исследуемого динамического процесса при электроразряде.

В данной главе исследуются основные схемы для моделирования различных электродных систем с целью выявления характерных особенностей, связанных с пробоем межэлектродного промежутка. С помощью разработанной модели установлено влияние различного вида электродов на электрические поля, возникающие при высоковольтном разряде в жидкости. В основе алгоритма расчета распределения электрического потенциала, силовых линий и равных напряженностей поля лежат прямая и обращенная модели. На их основе выполняется расчет канала пробоя в жидкости (рис. 3).

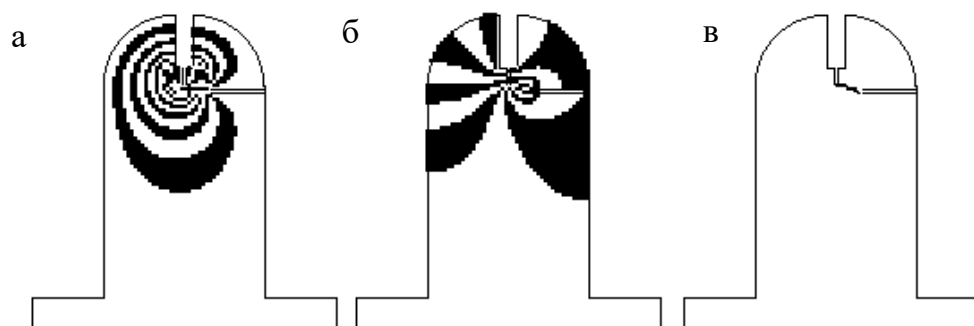


Рис. 3. Определение расположения в пространстве границы канала пробоя в камере МРБ с двумя изолированными электродами:

а – эквипотенциальные линии; б – силовые линии; в – канал пробоя

Исследовано для одной из камер МРБ влияние на гидродинамическое поле давлений следующих граничных поверхностей: формы купола при наличии изолированного электрода и без него; зазора между камерой МРБ и плоской преградой; высоты камеры МРБ; диаметра камеры МРБ. Установлено, что влиянием формы купола на исследуемый процесс можно пренебречь, если диаметр изолированного электрода сопоставим с радиусом камеры. Относительное изменение высоты камеры  $L^*_0$  от 0,5 до 2,0 радиусов камеры несущественно влияет на исследуемый эффект. При изменении относительного диаметра камеры в диапазоне  $d^*=0,75$  до  $d^*=2,0$  наблюдается существенное повышение максимального давления при  $d^*=1,25...1,5$ , причем в исследуемом диапазоне сохраняется данный эффект. С увеличением относительной величины зазора между камерой МРБ и преградой максимальное давление при асимметричном эффекте уменьшается.

Для проверки правильного отражения характерных особенностей процессов при электроразряде в жидкости, полученных с помощью математической модели, проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными. Для этого выбраны следующие схемы. Схема с одной разрядной камерой позволяет выявить основные особенности нагружения преграды. Результаты расчетов по объемной модели показаны на рис. 4. Схема с двумя камерами дает возможность определить параметры зоны взаимодействия для минимального количества камер (результаты расчетов на рис. 5). Три камеры представляют одну из элементарных схем, из которых состоят другие более сложные схемы, встречающиеся на практике (результаты расчетов на рис. 6). При сравнительном анализе экспериментальных данных, выполненных в Харьковском авиационном институте\*, и расчетных установлено качественное совпадение результатов для одной, двух и трех смежных камер МРБ. Подтверждена возможность дополнительной концентрации энергии при электрогидравлическом эффекте за счет использования смежных камер МРБ и при заданной ориентации каналов разрядов.

\* Чебанов Ю.И., Борисевич В.К., Князев М.К. Формирование поля давления на заготовке при штамповке на электрогидравлических установках // Кузнечно-штамповочное производство. 1996. №4. С.15-18.

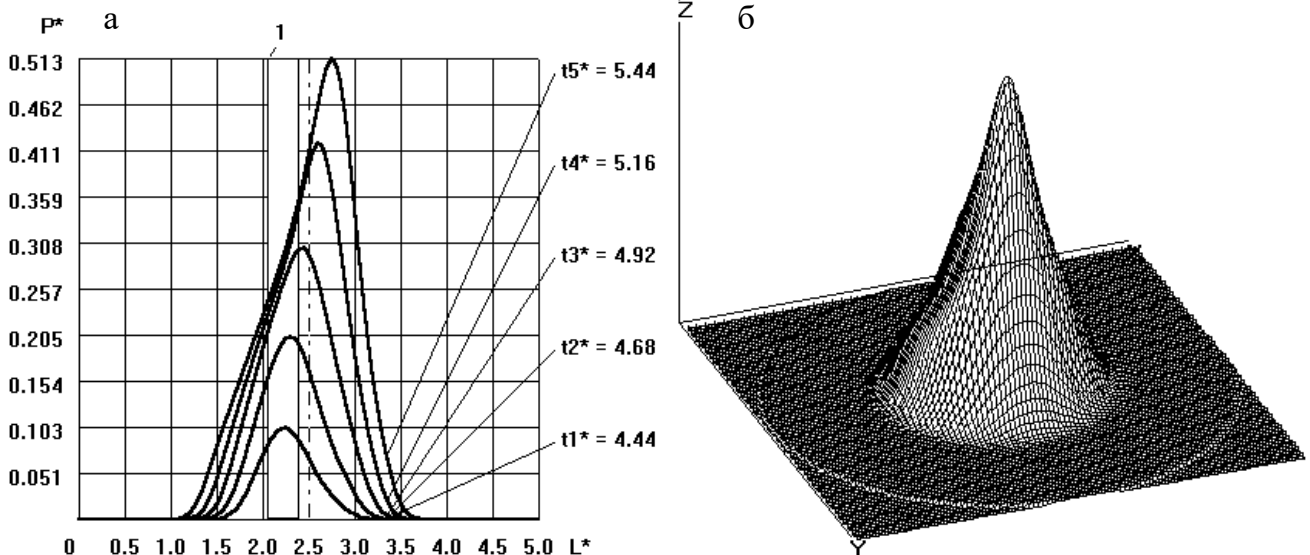


Рис. 4. Эпюры давлений на преграде для одной камеры МРБ:

а –  $P^*(t)$  на преграде в вертикальном сечении, проходящем через канал разряде камеры;  
 б –  $P^*(t)$  в объеме для момента времени  $t_5^* = 5,44$

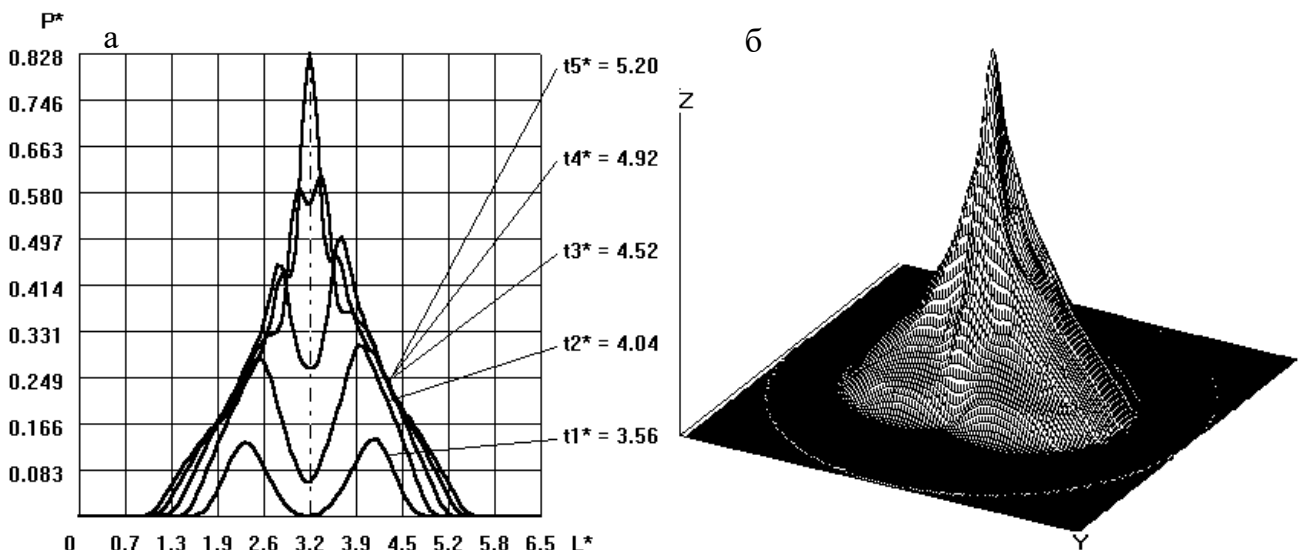


Рис. 5. Эпюры давлений для двух камер с расходящейся ориентацией каналов разряда в пространстве: а –  $P^*(t)$  на преграде в вертикальном сечении, проходящем через канал разряде камеры; б –  $P^*(t)$  в объеме для момента времени  $t_{45}^* = 5,2$

Выполнено детальное исследование волновых процессов в жидкости с учетом ударной волны, возникающей при выходе детонационной волны на границу раздела сред газ-жидкость (рис. 7). Анализ полученных результатов показал, что разработанная методика позволила в исследуемых процессах учесть сложный и многоэтапный характер изменения давления, связанный со спецификой детонации горючей газовой смеси в длинных цилиндрических камерах. Однако, основная энергия взрыва газового заряда в цилиндрических камерах с длиной, намного превышающей их диаметр, сосредоточена в

продуктах детонации, а не в ударной волне, что подтверждают результаты расчетов и аналогичные результаты экспериментальных данных.

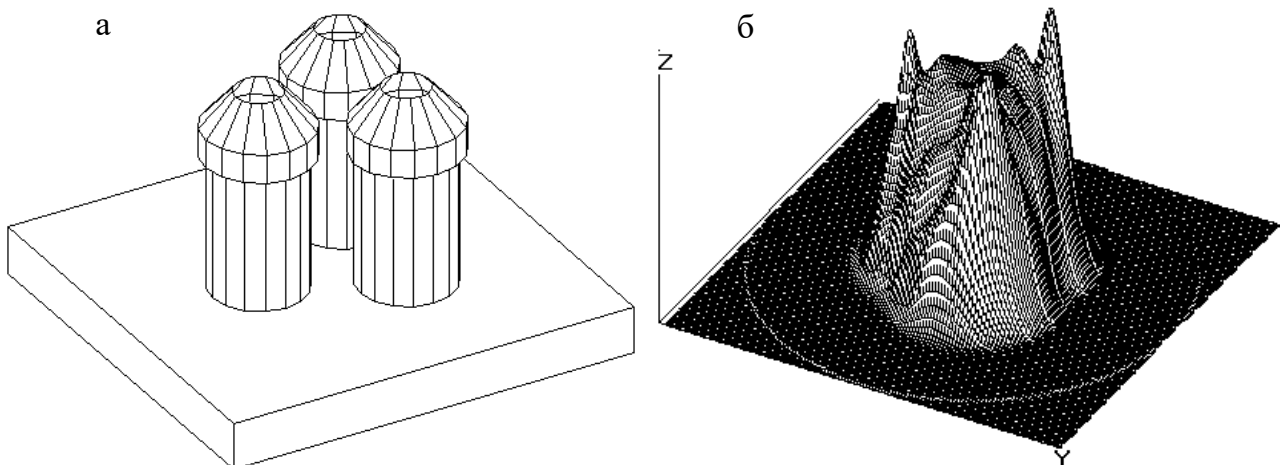


Рис. 6. Схема моделирования объемной модели с тремя камерами (а) и эпюра давления для трех камер со сходящейся ориентацией каналов разряда в пространстве для момента времени  $t^*_3=4,6$ (б)

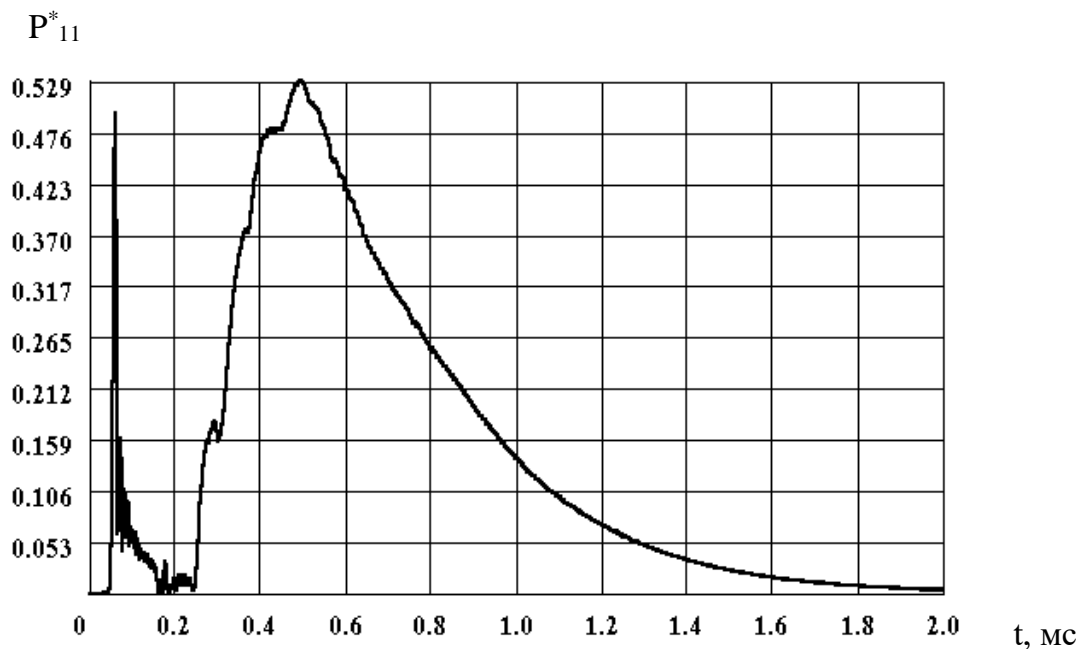


Рис. 7. Зависимость  $P^*_{11}=f(t)$  для  $l_g^*=4$  в точке  $Q_1$

В результате численных расчетов установлено, что при определении характера изменения в жидкости границ газообразной полости, образующейся при детонации горючей газовой смеси в удлиненной цилиндрической камере, можно не учитывать энергию ударной волны.

Представляет практический интерес исследование неосесимметричного расположения насадка таким образом, чтобы одна из его боковых стенок была ближе к импульсному источнику, чем другая. Таким образом создается конфигурация почти аналогичная имеющейся в разрядной камере ЭГИУ. И хотя на эпюре давлений от ударной волны наблюдается неосесимметричное распределения давления на преграде, но первый им-

пульс расположен справа от источника, тогда как для разрядных камер МРБ электрогидроимпульсной установки он наблюдался слева.

На базе выполненных исследований сформулированы практические рекомендации для исследуемых процессов, основанных на электрогидравлическом эффекте и детонации горючей газовой смеси, а также области применения [11-12].

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В настоящей работе решена задача построения математической модели, алгоритмов и пакета прикладных программ для исследования многомерных волновых процессов, протекающих в ограниченном объеме жидкости при электроразрядах и методики учета влияния ударной волны на динамические процессы при детонации горючей газовой смеси.

Основные результаты и выводы по работе следующие:

1. Разработана математическая модель для исследования многомерных волновых процессов, протекающих в ограниченном объеме жидкости и возникающих при электроразряде.

2. Разработана методика учета влияния ударной волны при моделировании динамических процессов, протекающих в жидкости, при детонации горючей газовой смеси в цилиндрической камере.

3. Разработана двухуровневая сеточная модель, позволяющая автоматизировать процесс построения геометрической конфигурации модели и задания исходных граничных условий.

4. Выполнена модификация численного метода решения системы разностных уравнений, построенных по явной трехслойной схеме, позволяющая уменьшить требуемый объем оперативной памяти ЭВМ.

5. Разработаны алгоритмы и пакет прикладных программ для исследования волновых процессов при электроразрядах и детонациях газовых смесей в жидкости, обладающие практической ценностью для АРМ технолога и конструктора импульсного оборудования.

6. Сравнительный анализ результатов расчета и экспериментальных данных подтвердил адекватность разработанной математической модели физике исследуемых процессов, а также устойчивую и правильную работу алгоритмов и пакета прикладных программ.

7. Проведенная на основе математической модели серия вычислительных экспериментов позволила установить следующие особенности исследуемых процессов:

– установлено, что максимальная концентрация напряженности поля возникает в случае применения одного изолированного электрода, а другого не изолированного, имеющего значительно большую поверхность.

- подтверждено существование эффекта, возникающего при расположении импульсного источника со смещением относительно центральной линии разрядной камеры в одну из сторон, причем величина максимального давления в этом случае на преграде возникает не под импульсным источником, а асимметрично ему;
- определено влияния границ, а именно, высоты камеры, диаметра камеры, зазора между камерой МРБ и преградой, купольной части камеры на гидродинамическое поле давлений в камере электрогидроимпульсной установки;
- подтверждена возможность дополнительной концентрации энергии при электрогидравлическом эффекте за счет использования смежных камер МРБ и при заданной ориентации каналов разрядов, а также зависимость  $P_{\max}^*$  от зазора между камерой и преградой;
- установлена возможность идентификации результатов экспериментов и физической интерпретации происходящих процессов при высоковольтном разряде вблизи жестких границ;
- сопоставительный анализ расчетных и экспериментальных данных для исследуемых волновых процессов при газовом взрыве показал, что погрешность при определении градиента нарастания и снижения давления отличается от экспериментальных результатов на 10...12%.
- сравнение результатов расчета по разработанной модели и с расчетами других авторов показало, что данная модель позволяет учитывать влияние ударной волны на исследуемые динамические процессы при взрыве газового заряда. При этом установлено хорошее совпадение с результатами экспериментов. Также подтверждено, что основная энергия взрыва газового заряда в удлиненных цилиндрических камерах сосредоточена в продуктах детонации, а не в ударной волне.

8. На базе выполненных исследований сформулированы практические рекомендации для исследуемых процессов, основанных на электрогидравлическом эффекте и детонации горючей газовой смеси.

### **Основные положения диссертации изложены в работах:**

1. Потапенко А.Н., Штифанов А.И., Эль-Хаммудани А. Математическая модель динамических процессов при импульсном нагружении материалов. - Тез. докл. межд. конф. - Белгород. 1995. Ч.4. - С. 102 - 103.
2. Потапенко А.Н., Штифанов А.И., Эль-Хаммудани А. Численное моделирование волновых процессов в жидкости при газовом взрыве // В сб.: Информационные технологии в строительстве. Белгород, БелГТАСМ, 1996 - С. 81-88.
3. Потапенко А.Н., Эль-Хаммудани А, Штифанов А.И. Математическая модель расчета нестационарных и нелинейных процессов в жидкости при импульсных воздействиях. Там же. С. 106-111.



4. Shtifanov A.I., Potapenko A.N., El-Hammoudani A. Simulation of Dynamic Processes at Powdery Materials Pulse Loading // Congress guide: World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Washington, 1996. - P. 148-149.
5. Shtifanov A.I., Potapenko A.N., El-Hammoudani A. Simulation of Dynamic Processes at Powdery Materials Pulse Loading // In book. Modeling. Compaction. Testing. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials. Part 7, MPIF, Washington, 1996. - P. 3-12.
6. Потапенко А.Н., Штифанов А.И., Эль-Хаммудани А. Модель для исследования газодинамических потоков при нанесении покрытий на детали транспортных объектов // Журнал "Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте", N3, 4(2), 1996. -С. 52-53.
7. Потапенко А.Н., Штифанов А.И. Использование графического интерфейса при математическом моделировании динамических процессов в объектах управления. // Журнал "Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте", N4, 1997. - С.79.
8. Потапенко А.Н., Штифанов А.И. Моделирование волновых процессов при электро-разрядах в жидкости. // В сб. мини-конференции: "Математическое моделирование и информационные технологии" - Белгород. 1997. Ч.8. - С. 88 - 94.
9. Штифанов А.И. Программа моделирования электрического поля в электрогидравлическом разрядном блоке Там же. С. 86 - 88.
10. Штифанов А.И. Алгоритм моделирования волновых процессов в электрогидравлическом разрядном блоке. Там же. С. 104 - 106.
11. Потапенко А.Н., Семернин А.Н., Раков И.В., Штифанов А.И. Возможности восстановления фильтрующих сеток с помощью эффекта детонации горючей газовой смеси // В сб.: Производственные технологии. - Липецк: Липецкое изд-во, 1997. - С. 91-93
12. Потапенко А.Н., Штифанов А.И., Семернин А.Н. Моделирование волновых процессов при детонационно-газовой обработке фильтрующих сеток // Известия вузов. Строительство. №2, 1998. С. \_\_ - \_\_.