

На правах рукописи



**Березин Евгений Николаевич**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ИДЕАЛЬНОЙ  
НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНЫМИ  
ГРАНИЦАМИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

05.13.18 — математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Кемерово — 2006

Работа выполнена в центре новых информационных технологий  
Кемеровского государственного университета

**Научный руководитель:** доктор физико–математических наук,  
профессор Афанасьев Константин Евгеньевич

**Официальные оппоненты:** доктор физико–математических наук,  
с.н.с. Стурова Изольда Викторовна

доктор физико–математических наук,  
профессор Хакимзянов Гаяз Салимович

**Ведущая организация:** Томский государственный университет,  
г. Томск

Защита состоится 28 декабря 2006 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д003.046.01 при Институте вычислительных технологий СО РАН: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВТ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном зале вычислительной математики и информатики научного отделения СО ГПНТБ (проспект академика М.А.Лаврентьева, 6).

Автореферат разослан 27 ноября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н., профессор



Л.Б. Чубаров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию двумерных течений идеальной однородной несжимаемой жидкости с поверхностными гравитационными волнами методом граничных элементов, вопросам эффективного использования современных вычислительных технологий и методов параллельного программирования, а также разработке проблемно-ориентированной оболочки для информационной поддержки вычислительного эксперимента.

**Актуальность темы.** Постоянное развитие вычислительной техники и средств хранения информации открывает новые возможности для решения различных народно-хозяйственных задач, в частности задач движения жидкости со свободными границами. Результаты исследований течений жидкости со свободными поверхностями находят многочисленные технические приложения, в таких областях как физическая океанология, гидротехника, кораблестроение и др. Эти задачи традиционно считаются непростыми, поскольку к нелинейности краевой задачи добавляется еще и дополнительная сложность, связанная с определением заранее неизвестной формы свободной границы. Примерами таких течений являются: нестационарное движение волн над неровным дном, выход волн на мелководье, эволюция свободной поверхности под действием силы тяжести, движение тел в жидкости, взаимодействие поверхностных волн с препятствиями, распространение волн цунами и т.д.

В полной нелинейной постановке, при режимах движения, наиболее интересных для исследования, сильно проявляются нелинейные эффекты, связанные с весомостью жидкости: опрокидывание волн, разрушение волн на мелководье и т.д. Физические эксперименты для изучения этих явлений оказываются сложными и дорогостоящими, поэтому важной задачей является разработка численных алгоритмов для решения задач со свободными границами.

Широкий круг задач со свободными границами, требует для своего решения значительных вычислительных ресурсов. Повышенные требования к производительности и памяти обусловлены сложными нелинейными моделями среды, описываемыми большим числом уравнений, пространственным характером задачи и нестационарностью протекающих процессов. Для моделирования таких задач требуется высокое быстродействие, а также необходима обработка и хранение большого объема информации, что предъявляет повышенные требования к вычислительным системам.

Таким образом, исследование задач со свободными границами с помощью новых информационных технологий является актуальным ввиду несомненной востребованности результатов в практических приложениях, в частности для принятия решений при конструировании разнообразных гидротехнических и морских сооружений.

**Цель работы** заключается в решении двумерных нелинейных задач гидродинамики идеальной однородной жидкости со свободными границами, а также построение эффективного параллельного численного алгоритма метода граничных элементов, и автоматизации обработки результатов численных расчетов.

**Методика исследования.** При решении поставленных задач использовались современные методы решения задач теории потенциальных течений и методы объектно-ориентированного программирования.

**На защиту выносятся:**

Решение нестационарных задач волновой гидродинамики при взаимодействии нелинейных поверхностных волн с препятствиями, частично или полностью погруженными в жидкость.

Решение нестационарной задачи о генерации волн цунами движением оползня для разных законов движения и его геометрических параметров.

Параллельная реализация метода граничных элементов и проблемно-ориентированная оболочка автоматизированного сопровождения вычислительного эксперимента для задач идеальной несжимаемой жидкости со свободными границами.

**Научная новизна.** Выявлены эффекты опрокидывания волн на свободной поверхности в зависимости от амплитуды набегающей волны и геометрии тела. Получены некоторые новые результаты по изменению динамической нагрузки на твердых границах препятствия и бассейна, в зависимости от варьируемых параметров задачи.

В полной нелинейной постановке проведено исследование задачи о генерации волн цунами движением оползня в зависимости от варьируемых параметров. Выявлены эффекты опрокидывания волн на свободной поверхности в зависимости от типа движения и геометрических параметров оползня.

Разработан инструментарий автоматизации численного эксперимента и средств хранения информации (свидетельство об официальной регистрации программы РОСПАТЕНТ).

**Достоверность** полученных результатов обеспечена: апробированностью используемых моделей гидродинамики, строгостью математической постановки задач, тестированием результатов на известных аналитических решениях, сравнением с имеющимися данными экспериментальных и численных исследований.

**Практическая значимость.** Полученные в диссертации результаты способствуют более глубокому пониманию значения нелинейных эффектов при исследовании задач идеальной однородной несжимаемой жидкости, а разработанный инструментарий расширяет возможности численного моделирования гидродинамических задач со свободными границами. Из-

ложенный материал может представлять интерес для специалистов, занимающихся моделированием реальных волновых процессов в жидкостях. Предложен новый современный подход к хранению, обработке и структурированию результатов численных расчетов. Кроме того, возможно решение задач идеальной несжимаемой жидкости со свободными границами с использованием параллельного алгоритма метода граничных элементов.

Задачи о взаимодействии уединенной волны с частично или полностью погруженным в жидкость телом выполнены в рамках договоров ИВТ СО РАН и совместной лаборатории Кемеровского государственного университета ИВТ СО РАН. Задача о генерации поверхностных волн движением оползня выполнена в рамках интеграционного проекта фундаментальных исследований Объединенного ученого совета по механике и энергетике СО РАН (2006-2008) по теме "Численное моделирование нестационарного взаимодействия сложных упругих конструкций с жидкостью или газом".

**Апробация работы.** Основные результаты докладывались и обсуждались на V Сибирской школе-семинаре "Математические проблемы механики сплошных сред" (Новосибирск, 2001г.), Международной конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, 2002г.), IV Международной конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Красноярск, 2003г.), V Международной конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, 2004г.), I региональной научно-практической конференции "Информационные недра Кузбасса" (Кемерово 2001г.), II региональной научно-практической конференции "Информационные недра Кузбасса" (Кемерово 2003г.), III региональной научно-практической конференции "Информационные недра Кузбасса" (Кемерово 2004г.), Международной конференции "High Speed Hydrodynamics" (Чебоксары 2004г.), VI Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (с участием иностранных ученых) (Кемерово 2005г.), IX Международной летней научной школе "Гидродинамика больших скоростей и численное моделирование" (Кемерово 2006г.), на научном семинаре "Численные методы решения задач механики сплошной среды" Кемеровского университета (Кемерово, 2000-2006гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикации, в знаменателе – объем, принадлежащий автору) 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для представления кандидатской диссертации (1,6/1,2 печ. л.), 9 – в трудах международных и всероссийских конференций (3,3/1,6 печ. л.). Основные результаты диссертации опубликованы в

работах [1-11]. При выполнении работ [1-2], опубликованных совместно с научным руководителем и другими соавторами, автор диссертации принимал участие в разработке и реализации проблемно-ориентированной оболочки, интерфейса обмена данными и базы данных расчетов. В соавторстве с научным руководителем [4,7,8,10] автору диссертации принадлежит участие в постановке задачи, исследование численных алгоритмов, обсуждении полученных результатов, подготовке и представлении статей и докладов на конференциях. Автором выполнена программная реализация численных алгоритмов, проведены расчеты тестовых задач и значительный цикл вычислительных экспериментов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения и списка литературы. Выполнена на 145 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц, 141 рисунок. Список литературы включает 133 наименования.

### **Краткое содержание работы**

*Во введении* сформулированы цели диссертационной работы, обоснована актуальность решаемых задач. Излагаются основные результаты, содержащиеся в диссертации.

*В первой главе* рассматриваются вопросы построения математической нестационарной постановки идеальной однородной несжимаемой жидкости со свободными границами. Рассматривается метод граничных элементов основанный на третьей формуле Грина для плоских задач. Обсуждаются методы решения системы линейных алгебраических уравнений, алгоритм движения по времени, а также алгоритмы вычисления кинематических и гидродинамических характеристик.

*Параграф 1.1* содержит описание постановки для плоской нестационарной задачи движения идеальной однородной несжимаемой жидкости со свободными границами.

Пусть  $D \in R^2$  фиксированная область с границей  $\Gamma$ , занятая однородной несжимаемой жидкостью. В этом случае плотность жидкости  $\rho$  во всей области  $D$  постоянна. Предположим, что течение является потенциальным, т.е. для вектора скорости  $\vec{v} = v(\mathbf{x}, t)$  существует функция  $\varphi(\mathbf{x}, t)$  такая, что  $\vec{v} = grad\varphi$ . Здесь  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(x, y)$  - радиус-вектор точки области течения  $D$ . Тогда для потенциального течения однородной несжимаемой жидкости внутри и на границе области ( $\bar{D} = \Gamma \cup D$ ) справедливо уравнение Лапласа

$$\Delta\varphi(\mathbf{x}, t) = 0, \quad \mathbf{x} \in D. \quad (1)$$

Граничные условия задаются либо в виде условия Дирихле (потенциал скорости принимает заданные значения на границе области), либо в виде условия Неймана (задается нормальная производная от потенциала скорости).

Приведем пример постановки нестационарной задачи движения жидкости в бассейне конечной глубины. Пусть в области  $D$  ограниченной твердыми и свободной границами, требуется найти решение уравнения Лапласа (1), удовлетворяющего на твердых границах  $\Gamma_2$  условию непротекания (2). На свободной границе  $\Gamma_1$  задаются кинематическое и динамическое условия (3).

$$\varphi_n = 0, \quad z \in \Gamma_2, \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \nabla\varphi, \quad \frac{d\varphi}{dt} - \frac{1}{2}|\nabla\varphi|^2 + gy + \frac{P}{\rho} = c(t), \quad \mathbf{x} \in \Gamma_1. \quad (3)$$

Здесь  $c(t)$  – функция от времени, равная значению левой части в некоторой точке пространства. Если жидкость на бесконечности покоится и давление на уровне  $y = 0$  равно нулю, то  $c(t) = 0$ . Из решения нелинейной стационарной задачи в качестве начальных условий задается начальное положение свободной границы  $\Gamma_1$  в момент времени  $t = 0$  и распределение потенциала  $\varphi$  на ней. Алгоритм построения стационарных уединенных волн, на основе метода граничных элементов и идеи Л.Г. Гузевского [Гузевский, Л. Г. Обтекание препятствий потоком тяжелой жидкости конечной глубины / Л. Г. Гузевский // Динамика сплошных сред с границами раздела. - 1982. - С. 61-69.] о выделении двух решений, реализован в работах К.Е. Афанасьева, С.В. Стуколова [Афанасьев, К. Е. КМГЭ для решения плоских задач гидродинамики и его реализация на параллельных компьютерах / К. Е. Афанасьев, С. В. Стуколов : учеб. пособие. - Кемерово: Изд-во КемГУ, 2001. - 208 с.]. Из решения данной задачи определяется точная форма уединенной волны и распределение на ней потенциала, для дальнейшего использования в решении нестационарных задач.

Для удобства численной реализации краевая задача (1)-(3) для потенциала скоростей записана в безразмерном виде, где в качестве характерных величин выбираются ускорение свободного падения  $g$  и глубина бассейна  $H$ . Безразмерные переменные  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{t}$  и  $\bar{C}$ , записываются следующим образом:

$$\bar{x} = x/H, \quad \bar{y} = y/H, \quad \bar{t} = t\sqrt{\frac{g}{H}}, \quad \bar{C} = \frac{C}{\sqrt{gH}} = F,$$

где  $C$  – скорость волны и  $F$  – число Фруда. При этом уравнения (1), (2) остаются без изменений, а динамическое условие (3) принимает вид:

$$\frac{d\varphi}{dt} - \frac{1}{2}|\nabla\varphi|^2 + y = 0, \quad \mathbf{x} \in \Gamma_1. \quad (4)$$

Тильда над безразмерными переменными в формуле (4) и далее опускается. Требуется определить положение свободной поверхности и распределение поля скоростей на ней в последующие моменты времени.

*Параграф 1.2* содержит описание метода граничных интегральных уравнений, основанный на третьей формуле Грина для плоской задачи. Для описания функции на границе области используются линейные граничные элементы. Рассматриваются вопросы вычисления сингулярных и регулярных интегралов. Обсуждаются вопросы решения системы линейных алгебраических уравнений. Рассматривается метод решения нестационарной задачи, который заключается в разбиении исходной задачи на последовательность линейных задач теории потенциала и описывается алгоритм автоматического выбора шага по времени и алгоритм движения по времени для нестационарных задач со свободными границами.

*В параграфе 1.3* описываются формулы высокого порядка точности для дифференцирования функций заданных на границе. Затрагиваются вопросы нахождения давления внутри области течения, а также приводятся формулы для вычисления интегральных характеристик (кинетической и потенциальной энергии, массы и динамической нагрузки).

В следующем пункте рассматривается вычисления давления. Для этого необходимо решить дополнительную краевую задачу вида

$$\Delta\varphi_t = 0, \quad \mathbf{x} \in D \quad (5)$$

$$\varphi_t = -\frac{1}{2} |\nabla\varphi|^2 - y, \quad \mathbf{x} \in C \quad (6)$$

$$\frac{\partial\varphi_t}{\partial n} = 0, \quad \mathbf{x} \in \Gamma. \quad (7)$$

Из решения краевой задачи (5-7) находим  $\varphi_t$  на границе  $\Gamma$ . После этого давление вычисляется по формуле:

$$P(\mathbf{x}) = -(\varphi_t + \frac{1}{2} |\nabla\varphi|^2 + y). \quad (8)$$

По строительным нормам и правилам [Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) : СНиП 2.06.04-82\*(с изм. 2.1995) / Госстрой СССР. - М., 1989. - 72 с.] основным параметром при проектировании гидротехнического сооружения служат внешние нагрузки, создаваемые волнением поверхности воды. Нагрузка  $P_s$  вычисляется по следующей формуле:

$$P_s = \int_a^b P_w d\Gamma. \quad (9)$$

где  $P_w = P - P_0$  – волновое давление,  $P$  - распределение давления на каждом шаге по времени,  $P_0$  - распределение давления в начальный момент времени  $t = 0$ .



**Во второй главе** приводится решение ряда двумерных задач гидродинамики идеальной однородной несжимаемой жидкости, а также проводится тестирование алгоритмов, описанных в первой главе.

*Параграф 2.1* на ряде тестовых задач демонстрируется применимость метода граничных элементов для решения нестационарных задач движения идеальной несжимаемой жидкости со свободными границами.

Метод граничных элементов для решения плоских задач со свободными границами тестировался методом пробных функций. Такой тест предложен в работе А.Г. Петровым и В.Г. Смоляниным [Петров, А. Г. Расчет нестационарных волн на поверхности тяжелой жидкости конечной глубины / А. Г. Петров, В. Г. Смолянин // ПММ. - 1987. - Т. 54, № 4. - С. 137-143.]. Требуется найти решение уравнения Лапласа в области  $D = \{0 \leq x \leq 2\pi; -1 \leq y \leq 0, 5\sin(x)\}$ . На дне и вертикальных стенках задается условие непротекания:  $\partial\varphi/\partial n = 0$ , а на верхней границе задается условие вида:  $\varphi(x, y) = \cos(x)\cosh(y + 1)$  являющееся гармонической функцией. Найденное решение сравнивается с точным аналитическим решением. В таблице 1 приведены относительные погрешности вычисления искомых функций. Значения приведены в зависимости от дискретизации

Таблица 1. Относительные погрешности.

$N/N_g$	$\varepsilon(\varphi_n)$	$\varepsilon(V_x)$	$\varepsilon(V_y)$	$K(A)$
100/43	6.83E-03	2.27E-03	8.55E-03	133
200/87	4.54E-03	1.11E-03	.00E-03	273
400/175	2.51E-03	6.26E-04	3.73E-03	561
800/351	1.21E-03	6.90E-04	2.24E-03	1189
1500/659	5.90E-04	8.17E-04	1.44E-03	2395

области ( $N$  - число узлов на всей границе,  $N_g$  - число узлов на свободной границе области). В пятой колонке приводятся числа обусловленности  $K(A)$  матрицы  $A$  системы линейных алгебраических уравнений. Из таблицы видно, что метод обладает достаточной точностью.

В качестве другой тестовой задачи приводится задача о распространении уединенной волны амплитуды  $A = 0.5$ , постоянной глубины  $H = 1$ . В процессе движения волна должна сохранять свою амплитуду, скорость, форму и полную энергию. Шаг по времени выбирается автоматически. Для расчета выбирается область  $D = \{-15 \leq x \leq 75; -1 \leq y \leq y_0\}$ , где  $y_0 = y_0(x)$  описывает форму уединенной волны. Вершина волны при  $t = 0$  находится в точке  $x = -5, y = 0.5$ . Расчеты проводятся до момента безразмерного времени  $t = 50$ , когда вершина волны переходит в точку с абсциссой  $x = 56$ . К этому моменту времени волна проходит путь равный 5.5 длин волны. Длина волны  $l$  определяется длиной отрезка по оси  $x$ , на котором выполняется условие  $y(t) \leq 0.01A(t)$ .

Рост погрешности основных характеристик волны имеет линейный характер. В таблице 2 приводится изменение амплитуды, массы и полной энергии на длину пробега волны в зависимости от количества точек разбиения области ( $N$  - число узлов на всей границе,  $N_g$  - число узлов на свободной границе области). Видно, что при изменении количества узлов

Таблица 2. Погрешности основных характеристик волны.

$N/N_g$	$\varepsilon(A)$	$\varepsilon(M)$	$\varepsilon(E)$
310/151	3.30 %	0.55 %	0.78 %
514/301	1.98 %	0.47 %	1.00 %
718/451	1.56 %	0.46 %	1.10 %
922/601	1.49 %	0.48 %	1.12 %
1126/751	1.35 %	0.50 %	1.17 %
1330/901	1.38 %	0.52 %	1.18 %

на свободной границе с 300 до 900 погрешность уменьшается. При увеличении граничных элементов происходит рост погрешности. Оптимальная длина граничного элемента составляет приблизительно 0.2.

Тест на гидродинамические нагрузки рассматривается при решении задачи о накате солитона на вертикальную стенку. После отражения солитон восстанавливает свою первоначальную форму. При амплитудах  $A > 0.3$  расчетные хронограммы давления имеют два локальных максимума. Эти особенности при накате солитонов на вертикальную стенку подтверждаются экспериментами полученными С.В. Манойлиным [Манойлин, С. В. Некоторые экспериментально-теоретические методы определения воздействия волн цунами на гидротехнические сооружения и акватории морских портов: препринт / С. В. Манойлин. - Красноярск : ВЦ СО АН СССР, 1989. - № 5. - 50 с.]. Далее приводится тестовый расчет задачи о движении уединенной волны над прямоугольным выступом. Сравнение с численными результатами других авторов, показывает качественное и количественное совпадение результатов [Seabra-Santos, F. J. Numerical and experimental study of the transformation of a solitary wave over a shelf or isolated obstacle / F. J. Seabra-Santos, D. P. Renouard, A. M. Temperville // J. Fluid Mech. - 1987. - V. 176. - P. 117-134.].

В параграфе 2.2 рассматривается решение плоской нестационарной задачи о взаимодействии уединенной волны с частично погруженным в жидкость телом. В монографии Г.С. Хакимзянова, Ю.И. Шокина, В.Б. Барахнина, Н.Ю. Шокиной [Численное моделирование течений жидкости с поверхностными волнами / Г. С. Хакимзянов [и др.]. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. - 393 с.] проводится исследование влияния варьируемых параметров на величину заплесков, амплитуду отраженной и прошедшей волны, с помощью конечно - разностных методов расчета на

адаптивных сетках. Задача в полной нелинейной постановке решалась К.Е. Афанасьевым, Е.Н. Березиным [9]. В расчетной области  $D$  (рис. 1),

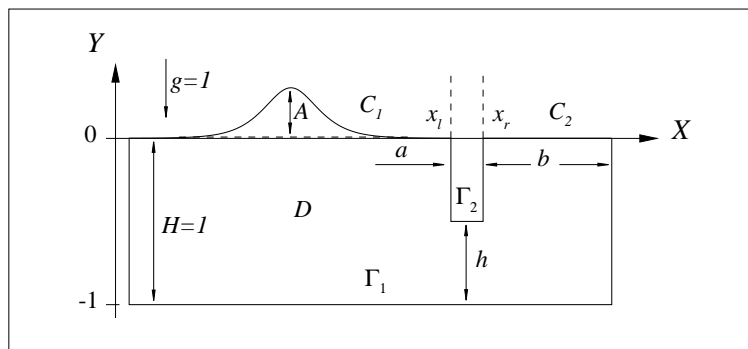


Рис. 1. Схема расчетной области

ограниченной поверхностями  $C_1$ ,  $C_2$  и  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ , решается уравнение Лапласа (1). Границы  $C_1$ ,  $C_2$  являются свободными поверхностями жидкости,  $\Gamma_1$  твердая граница бассейна,  $\Gamma_2$  твердая граница погруженного тела. На твердых границах выставляется условие непротекания (2). На свободной границе выполняются кинематическое и динамическое условия (3). Начальная форма уединенной волны и распределение потенциала на ней, получены из численного решения нелинейной стационарной задачи.

Приводятся результаты численных расчетов для задачи о взаимодействии солитона с частично погруженным в жидкость телом. Варьируемыми параметрами задачи являются величины:  $A$  - амплитуда волны,  $h$  - расстояние от дна до препятствия,  $a$  - протяженность препятствия,  $b$  - расстояние между правой границей тела и правой границей бассейна. Численные расчеты выполнялись для диапазона варьируемых параметров  $A \in [0.1 : 0.5]$ ,  $h \in [0.1 : 0.7]$ ,  $a \in [1 : 8]$  для случая когда: 1.) тело расположено далеко от правой стенки бассейна, где  $b$  изменялось  $22 \leq b \leq 29$  и 2.) тело расположено вблизи правой стенки бассейна, расстояние  $b$  было постоянным и равно  $b = 0.5$ .

*Тело расположено далеко от правой стенки бассейна.* Численные расчеты показали, что при увеличении протяженности тела  $a$  и уменьшении расстояния  $h$  величины заплеска (рис. 2а) и нагрузки на левой границе тела (рис. 2б – линии с маркерами) возрастают, а заплеск и нагрузка на правой границе тела убывают. На рисунке 2а,б показаны хронограммы для следующих параметров:  $A = 0.3$ ,  $h = 0.4$ ,  $a = 2$  (пунктирные линии) и  $A = 0.3$ ,  $h = 0.1$ ,  $a = 8$  (сплошные линии).

*В случае, когда тело расположено вблизи вертикальной правой стенки бассейна,* величина заплеска на правой границе тела (рис. 3а) может превосходить величину заплеска на левой (линии с маркерами) границе тела, чего не наблюдается для первого случая. Кривые на рисунке 3а приведены для следующих параметров:  $A = 0.3$ ,  $h = 0.4$ ,  $a = 2$ . На рисунке (рис.

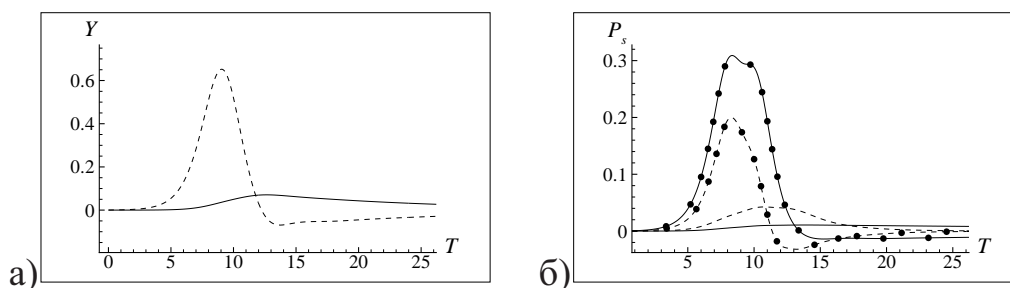


Рис. 2. Хронограммы (а) - максимального заплеска на левой (пунктирная линия) и правой границах тела и (б) - нагрузки на левой (линии с маркерами) и правой границах тела.

3б) показаны хронограммы динамической нагрузки для следующих параметров:  $A = 0.3$ ,  $h = 0.4$ ,  $a = 2$  (пунктирные линии) и  $A = 0.3$ ,  $h = 0.1$ ,  $a = 8$  (сплошные линии). Видно, что при увеличении протяженности тела и уменьшении расстояния  $h$  величина нагрузки на левой границе (линии с маркерами) тела возрастает, а на правой границе тела убывает.

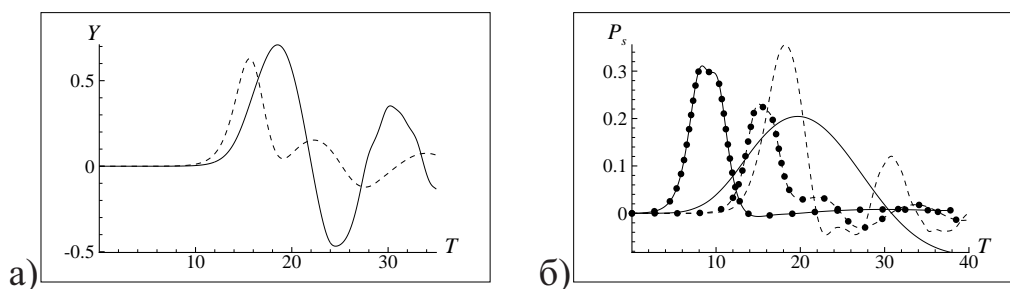


Рис. 3. Хронограммы (а) – максимального заплеска на правой и левой границах тела и (б) – нагрузки на правой и левой границах тела.

*Параграф 2.3* В настоящем параграфе представлены результаты расчетов волнового движения жидкости при взаимодействии уединенной волны с телом прямоугольного сечения, расположенным на горизонтальном дне. В работе М.Г. Хажоян, Г.С. Хакимзянова [Хажоян, М. Г. Численное моделирование поверхностных волн с подводными препятствиями / М. Г. Хажоян, Г. С. Хакимзянов // Вычислительные технологии. - 2003. - Т. 8, № 4. - С. 108-123.] данная задача исследуется с помощью конечно-разностных методов расчета на адаптивных сетках. В полной нелинейной постановке задача решалась К.Е. Афанасьевым, Е.Н. Березиным [7]. Постановка задачи повторяет постановку приведенную в Параграфе 2.2 за исключением того, что тело полностью погружено и располагается на дне. Параметр  $h$  рассматривается как высота выступа. Группа численных расчетов выполнялась для диапазона варьируемых параметров  $A \in [0.1 : 0.5]$ ,  $h \in [0.1 : 0.9]$ ,  $a \in [2 : 20]$  для случая когда: 1.) выступ расположен далеко от правой стенки бассейна, где  $b$  изменялось  $50 \leq b \leq 65$  и 2.) выступ расположен вблизи правой стенки бассейна, расстояние  $b$  было постоянным

и равно  $b = 0.5$ .

После взаимодействия волны с препятствием она распадается на прошедшие и отраженные волны. Установлено, что количество отраженных и прошедших волн зависит от изменения протяженности или высоты выступа.

*Выступ расположен далеко от правой стенки бассейна.* На рисунке 4а изображены хронограммы изменения нагрузки на левой (линии с маркерами) и правой границе препятствия. Пунктирные линии (рис. 4а,б) соответствуют следующим параметрам:  $A = 0.3$ ,  $h = 0.2$ ,  $a = 2$ . Сплошные линии (рис. 4а,б) получены для  $A = 0.3$ ,  $h = 0.4$ ,  $a = 15$ .

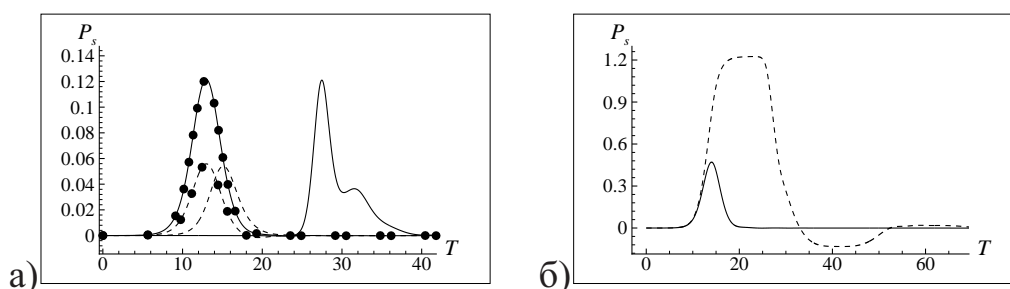


Рис. 4. Хронограммы динамической нагрузки (а) – на левой (линии с маркерами) и правой границах выступа и б) – на верхней границе препятствия.

В момент взаимодействия проходящей волны с лицевой границей тела (рис. 4а) нагрузка на ней достигает максимального значения, затем при дальнейшем движении волны над верхней границей препятствия, значение максимальной нагрузки принимает постоянное значение до момента времени (рис. 4б), когда волна не достигнет тыльной границы препятствия. При дальнейшем движении волны нагрузка на верхней границе препятствия убывает, в то время как на правой границе препятствия нагрузка возрастает и принимает максимальное значение равное максимальному значению нагрузки на верхней границе выступа.

*В случае, когда выступ расположен вблизи правой вертикальной стенки бассейна,* картина течения жидкости становится более сложной. На ри-

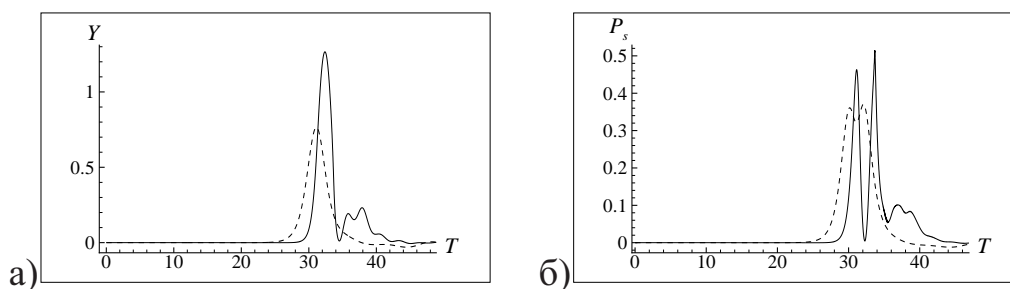


Рис. 5. Хронограммы (а) – максимального заплеска и (б) – нагрузки на правой границе бассейна.

сунках 5а,б приведены хронограммы изменения максимального заплеска

(рис. 5а) и динамической нагрузки  $P_s$  на правой стенке бассейна (рис. 5б). Хронограммы показаны для следующих параметров:  $A = 0.3$ ,  $h = 0.2$ ,  $a = 5$  (пунктирная линия) и  $A = 0.3$ ,  $h = 0.4$ ,  $a = 15$  (сплошная линия). При увеличении протяженности и высоты выступа величина заплеска (рис. 5а). Для хронограмм изменения динамической нагрузки наблюдается наличие двух максимумов (рис. 5б). Это явление можно объяснить следствием действия сил инерции, что характерно для случая, взаимодействия с вертикальной стенкой без тела.

**В третьей главе** приводится описание основных результатов исследования генерации поверхностных волн движением оползня. Численные результаты для нелинейно - дисперсионных моделей, линейной и нелинейной модели мелкой воды, а также для полной модели были получены коллективом института вычислительных технологий СО РАН: З.И. Федотовой, Л.Б. Чубаровым, С.А. Бейзель, С.В. Елецким, Г.С. Хакимзяновым [Моделирование генерации цунами движением оползня с учетом вертикальной структуры течения / Ю. И. Шокин, З. И. Федотова, Г. С. Хакимзянов, Л. Б. Чубаров, С. А. Бейзель // Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф : тр. VIII Всерос. конф. (Кемерово, 26-28 октября 2005 г.). - Кемерово, 2005. - С. 20-40.].

**В параграфе 3.1** приводится постановка нестационарной задачи. В расчетной области  $D$  (рис. 6), ограниченной свободной границей  $C$  и твердыми границами  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  решается уравнение Лапласа (1). На границе  $\Gamma_1$  выставляется условие непротекания (2). На границе оползня

$$\varphi_n = \vec{U} \cdot \vec{n}, \quad \mathbf{x}(x, y) \in \Gamma_2. \quad (10)$$

На свободной границе выполняются кинематическое и динамическое условия (3). Модельный оползень описывается функцией  $h(x, t)$  приведенной в работе P. Lynett (Lynett, P. A Numerical Study of Submarine Landslide Generated Waves and Runup / P. Lynett, P. L-F. Liu // Proc. Royal Society of London A. - 2002. - Vol. 458. - P. 2885-2910.).

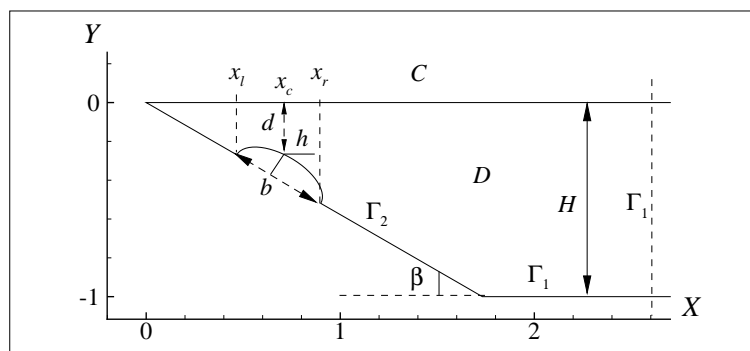


Рис. 6. Схема расчетной области

Рассматриваются пять типов движения оползня: "слайд 1", "слайд 2",

”слайд 3”, ”сламп 1”, ”сламп 2” (З.И. Федотова, Л.Б. Чубаров, С.А. Бейзель [и др.]).

В параграфе 3.2 приводятся анализ результатов и их сопоставление с мареограммами различных моделей. Расчеты проводятся в области с координатами  $x_0 = 1.0$  и  $x_n = 41.0$  до времени  $t = 50$ . Для моделирования оползневых движений используются следующие значения параметров:  $h = 0.05$ ,  $b = 1.0$ ,  $H = 2.3$ ,  $x_c = 2.38$ ,  $\beta = 6^\circ$ . Для изучения волновой картины были установлены семь мареографов с координатами:  $x_{M0} = x_{c0} - 1$ ,  $x_{M1} = x_{c0} = 2.38$ ,  $x_{Mi} = x_{Mi-1} + 2$ ,  $i = 2..6$ .

В процессе сравнения полной модели и НЛД моделей было получено близкое совпадение мареограмм для полной (тонкие линии) и двухслойной модели Лью-Линетта. Установлено, что с увеличением угла  $\beta$  мареограммы полученные по полной модели методом граничных элементов и двухслойной модели Лью-Линетта расходятся не только в мористой зоне, но и прибрежной тоже, после остановки оползня.

В полной нелинейной постановке выполнены сравнения мареограмм для разных толщин оползня. Сравниваются результаты, получены автором методом граничных элементов и Г.С. Хакимзяновым методом конечных разностей на адаптивных сетках. Установлено, что в прибрежной зоне методы дают близкие результаты для разных законов движения. Однако, в мористой зоне методы показывают достаточно близкие результаты до момента остановки оползня  $t = 30.0$  и различаются в поведении ”хвоста” мареограмм, для закона движения ”слайд 1” (7а) и ”сламп 2”. Для закона движения ”сламп 1” в мористой зоне различия результатов не наблюдается (7б).

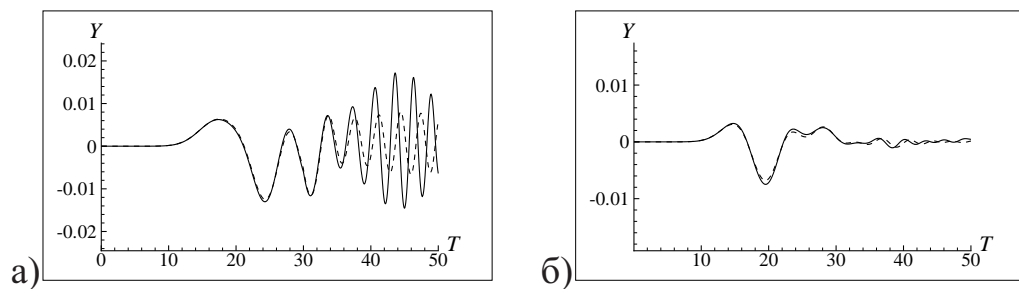


Рис. 7. Мареограммы полученные в седьмом мареографе, где (а) – ”слайд 1” и (б) – ”сламп 1”.

На рисунке 8а показаны мареограммы для первого мареографа, при следующих параметрах: толщина оползня равна  $\Delta h = 0.01$  (штриховая линия) и  $\Delta h = 0.05$  (сплошная линия), начальное положение центра масс  $x_c = 2.38$ . На рисунке 8б приведены мареограммы для первого (сплошные линии) и четвертого (пунктирные линии) мареографа, при следующих параметрах: протяженность оползня равна  $b = 1$  (линии без маркеров) и  $b = 3$  (линия с маркерами),  $x_c = 4.38$ ,  $\Delta h = 0.05$ . Видно, что увеличение толщины и протяженности оползня приводит к росту амплитуды мареограмм, при этом возможно возникновение сильно нелинейных эффектов,

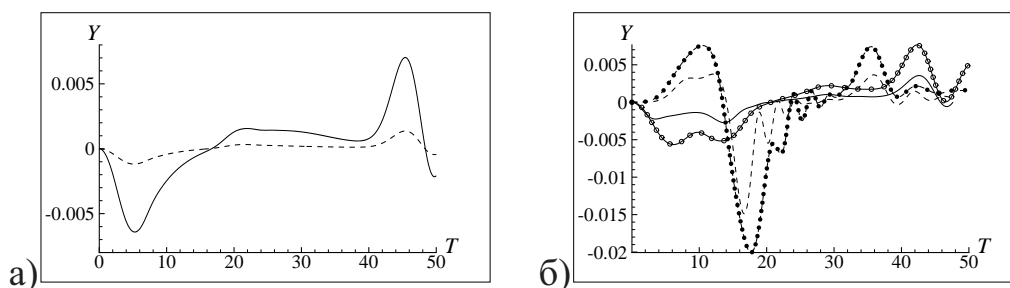


Рис. 8. Зависимость от (а) – толщины и (б) – протяженности оползня.

таких как опрокидывание волн.

**В четвертой главе** рассматривается ряд вопросов, связанных с решением задач идеальной несжимаемой жидкости со свободными границами на высокопроизводительных системах. Рассматривается проблемно - ориентированная оболочка для решения задач гидродинамики, автоматизирующая хранение и обработку необходимой исследователю информации на всех стадиях вычислительного эксперимента.

*Параграф 4.1.* В качестве вычислительного кластера использоались стандартные рабочие станций с операционной системой Linux. Компьютеры между собой связаны с помощью локальной сети. Программирование, выполнялось на основе модели передачи сообщений MPI. Декомпозиция области проводилась по границе расчетной области [Афанасьев, К. Е. КМГЭ для решения плоских задач гидродинамики и его реализация на параллельных компьютерах / К. Е. Афанасьев, С. В. Стуколов : учеб. пособие. - Кемерово: Изд-во КемГУ, 2001. - 206 с.].

Следующим пунктом является тестирование эффективности и ускорения параллельного алгоритма метода граничных элементов для двумерных задач со свободными границами на кластере кафедры ЮНЕСКО Кемеровского государственного университета (КемГУ) и Института вычислительных технологий СО РАН (ИВТ СО РАН). В качестве теста решается задача о генерации поверхностных волн движением оползня. Исследование производительности и эффективности программного кода выполняется в зависимости от размерности задачи и числа процессоров.

*Параграф 4.2.* В настоящее время перед исследователем остро стоят следующие проблемы: наиболее эффективного использования мощных технических возможностей для научной работы; систематизации и хранения уже полученных результатов в ходе проведения вычислений; использование вычислительных ресурсов или внешней памяти более мощных вычислительных систем, которые в настоящее время становятся все доступнее для широкого круга вычислителей.

Оболочка прототипа информационной системы "AKORD" представляет пользователю удобный интерактивный интерфейс при реализации всех основных этапов численного решения задач, начиная с ее постановки, и



заканчивая графическим анализом полученных результатов. Она обеспечивает согласованность данных для исследования задачи и корректный вызов всех необходимых компонент ИС при проведении расчетов. Кроме того, оболочка синхронизирует данные как на стороне сервера БД, выполняющего функции хранилища результатов расчетов, так и на стороне рабочей станции пользователя, непосредственно выполняющего действия по подготовке процесса численного решения задачи и последующей обработке результатов. Оболочка имеет модульную структуру (рис. 9). Все модули вызываются из оболочки, которая, в свою очередь, является обобщающим модулем, связывающим отдельные компоненты в единое приложение.

Все информационные потоки в ИС подчиняются четко определенному интерфейсу обмена данными между компонентами системы. Совокупность данных составляет некий набор знаний, связанный с исследуемой задачей. Этот набор данных поддерживается на рабочей станции пользователя, а при необходимости может быть помещен в БД расчетов для дальнейшего хранения. Для обработки и хранения данных была выбрана СУБД Oracle.

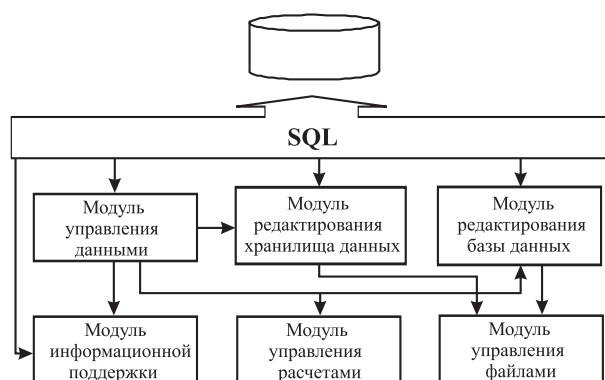


Рис. 9. Модульная структура оболочки

Физическая модель БД представлена совокупностью отношений, содержащих всю необходимую информацию и объединенных различными связями (функциональными зависимостями).

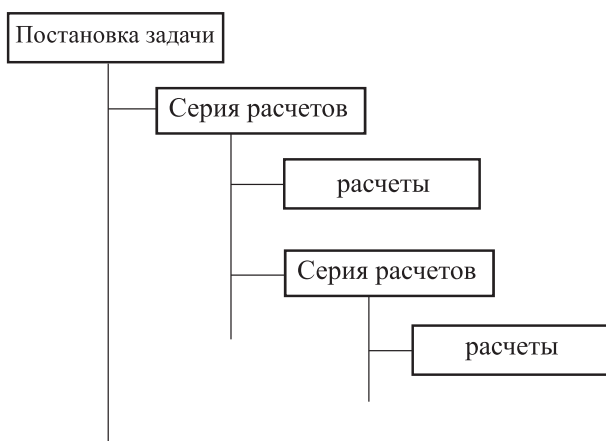


Рис. 10. Схема серии расчетов

Основной логической единицей базы данных расчетов является расчет, который соответствует исследуемой задаче. Часто исследователь проводит большое количество расчетов с целью выявить влияние на получаемое решение какого-либо одного параметра. Для учета этой специфики численного эксперимента в БД расчетов добавлено дополнительное отношение "Серии расчетов", которое позволяет объединить расчеты в некоторую последовательность по признаку, выбранному пользователем (рис. 10).

Все отношения в логической модели данных ИС удовлетворяют удо-

Все отношения в логической модели данных ИС удовлетворяют удо-

влетворяют требованиям четвертой нормальной формы. Результирующие таблицы физической модели данных сгенерированы так, чтобы учитывать особенность современных СУБД по автоматическому поддержанию целостности данных.

### **Основные результаты работы**

1. Для нестационарных задач о взаимодействии солитона с частично или полностью погруженными в идеальную однородную несжимаемую жидкость препятствием установлено влияние амплитуды волны  $A$ , высоты (или зазора)  $h$  и протяженности  $a$  препятствия на следующие характеристики: максимальный заплеск, амплитуда прошедшей волны  $a_p$ , амплитуда отраженной волны  $a_o$  и нагрузки на твердых границах  $P_s$ . Для различных значений амплитуды  $A$  набегающей волны, протяженности препятствия  $a$  и высоты (или зазора)  $h$  получены таблицы изменения параметров максимального заплеска, амплитуды прошедшей  $a_o$  и отраженной волны  $a_p$ , а также изменения динамической нагрузки  $P_s$ . Выявлены эффекты сильной деформации свободной границы "опрокидывание волн" в зависимости от геометрических характеристик препятствия.
2. Для задачи о генерации поверхностных волн движением оползня получены волновые режимы в зависимости от начального залегания  $d$ , толщины  $h$ , протяженности  $b$  и законов движения оползня. Установлено, что изменение геометрических параметров и схемы движения оползня, приводит к разным картинам формирования цуга волн различной амплитуды, движущихся к берегу и от него. Выявлены эффекты "опрокидывания волн" в зависимости от геометрических характеристик оползня.
3. Создан параллельный алгоритм метода граничных элементов, применяемого для решения задач механики жидкости.
4. Разработана проблемно-ориентированная оболочка для информационной поддержки вычислительного эксперимента для задач идеальной несжимаемой жидкости со свободными границами.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Афанасьев, К. Е. Распределенный пакет прикладных программ "AKORD" для проведения вычислительных экспериментов / А. М. Гудов, Е. Н. Березин [и др.] // Моделирование, вычисления, проектирование в условиях неопределенности 2000: тр. междунар. науч. конф - Уфа, 2000. - С. 47-57.
2. Афанасьев, К. Е. Интегрированная система поддержки численного эксперимента "AKORD" / К. Е. Афанасьев, А. М. Гудов, Е. Н. Березин [и др.] // Вестник КемГУ. - Кемерово, 2000. - № 4. - С. 82-92.

3. Березин, Е. Н. Исследование эволюции свободных границ при взаимодействии уединенной волны с препятствием / Е. Н. Березин // Новые технологии и математическое моделирование: матер. Всерос. науч.-практ. конф. - Анжеро-Судженск, 2002. - С. 28-30.
4. Афанасьев, К. Е. Моделирование нелинейных волновых течений при взаимодействии уединенных волн с препятствием / К. Е. Афанасьев, Е. Н. Березин // Информационные недра Кузбасса: матер. науч. практ. конф. - Кемерово, 2003. - С. 222-224.
5. Березин, Е. Н. Моделирование взаимодействия солитона с частично погруженным в жидкость телом / Е. Н. Березин // Наука и практика: Диалоги нового века: матер. Всерос. конф. - Анжеро-Судженск, 2003. - С. 32-35.
6. Березин, Е. Н. Численное моделирование поверхностных волн при взаимодействии уединенных волн с препятствием / Е. Н. Березин // Информационные недра Кузбасса: матер. науч. практ. конф. - Кемерово, 2004. - С. 235-238.
7. Afanasiev, K. E. Numerical modeling of surface waves interaction with a solid partially submerged into the fluid / K. E. Afanasiev, E. N. Berezin // High Speed Hydrodynamics. - June 2004. - P. 145-150.
8. Березин, Е. Н. Анализ динамических характеристик при взаимодействии уединенной волны с препятствием / К. Е. Афанасьев, Е. Н. Березин // Вычислительные технологии. - 2004. - Т. 9, № 3 - С. 22-37.
9. Березин, Е. Н. Трансформация солитона при воздействии с подводным препятствием / Е. Н. Березин // Информационные недра Кузбасса: матер. науч. практ. конф. - Кемерово, 2005. - С. 186-190.
10. Афанасьев, К. Е. Численное моделирование движения уединенной волны над подводным препятствием / К. Е. Афанасьев, Е. Н. Березин // Вычислительные технологии. - 2005. - Т. 10, № 2. - С. 15-26.
11. Березин, Е. Н. Применение средств параллельного программирования для численного моделирования движения оползня / Е. Н. Березин // Гидродинамика больших скоростей и численное моделирование: сб. тр. III Междунар. науч. летней школы - Кемерово, 2006. - С. 333-339.