

Министерство образования и науки Кыргызской Республики  
Кыргызский государственный технический университет  
им. И.Раззакова

УДК 620.10

*на правах рукописи*

САРБАЛИЕВ АНАРБАЙ ШАБОТОВЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТОВОГО ПОТОКА ПРИ  
СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПЛОТИНЫ ВЗРЫВООБВАЛЬНЫМ МЕТОДОМ  
(НА ПРИМЕРЕ ПЛОТИНЫ КАМБАРАТИНСКОЙ ГЭС -1)**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук, профессор  
Т.Б.Дуйшеналиев

Бишкек 2012

Работа выполнена в Кыргызском государственном техническом  
университете им. И. Раззакова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор **Т.Б.Дуйшеналиев**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор **Абдылдаев Э.К.**

доктор физико-математических наук,  
профессор **Адигамов Н.С.**

Ведущая организация: Институт геомеханики и использования  
недр НАН Кыргызской Республики

Защита состоится 25 января 2013 г. в 14:00 часов на заседании Межвузовского диссертационного совета Д.01.12.5 по защите диссертации на соискание ученой степени доктора наук при Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова (КГТУ) и Кыргызском государственном университете строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова (КГУСТА) по адресу: 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Мира, 66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять в адрес по месту защиты диссертации.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

Решением диссертационного совета Д.01.12.5 № \_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г. диссертация принята к защите и разрешается печатание автореферата.

Председатель диссертационного совета  
Д 01.12.5, д.ф.-м.н., профессор

**С.А.Абдрахманов**

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 01.12.5, к.ф.-м.н., доцент

**Ж.Д.Доталиева**

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность исследований.** Начиная с 50-х годов двадцатого столетия в Кыргызстане и Таджикистане началось бурное развитие гидротехнического строительства. Этому способствовали благоприятные природно-геологические условия: высокие и узкие каньоны, большие уклоны горных рек и наличие вблизи створов необходимых запасов строительных материалов. В основном начали строить бетонные и насыпные плотины из местных материалов. Однако за последние годы с ростом стоимости материалов и оборудования экономичность возведения плотин указанными методами стала резко снижаться. Ученые и проектировщики начали изыскивать новые методы, к которым можно отнести взрывной метод возведения плотин.

Существуют возможности упростить задачи взрыва для этого метода. При этом главная задача взрыва заключается в том, чтобы вывести горный массив на склоне из состояния равновесия. Вся остальная работа по дроблению, перемещению и укладке горной массы в тело плотины возлагается на освобожденную потенциальную энергию силы тяжести горных пород склона в процессе лавинообразного течения грунта.

В связи с намечаемым проектированием и будущим строительством плотин целого каскада ГЭС, большой акцент в диссертации сделан на изучение и установление особенностей возведения взрывообвальная плотины применительно к створу будущей Камбаратинской ГЭС-1.

Движение грунтового потока, оползней, селей, снежных лавин приводит к последствиям, которые на протяжении длительного периода остаются одной из наиболее крупных проблем человечества. Поэтому изучение движения этих явлений является актуальным и практически значимым.

Для описания движения грунтового потока (и близких по характеру движения водных, снежных и селевых потоков) используются математические модели теории мелкой воды (или теории длинных волн). Большое значение в создании математических методов и анализа эволюции нелинейных длинных волн имела аналогия между уравнениями мелкой воды и уравнениями газовой динамики.

В настоящей работе рассматривается плоскопараллельное течение грунтового потока, позволяющее ограничиться изучением одномерной нестационарной задачи. Для моделирования движения грунтового потока в качестве исходной взята модель уравнений однослойной мелкой воды, учитывающая турбулентное трение о дно, которая также использует осредненное по слою значение скорости. Соответствующие математические модели представляют собой начальные (начально-краевые) задачи для систем нелинейных дифференциальных уравнений гиперболического типа. Приближение мелкой воды, заключается в замене уравнения импульса для вертикальной составляющей вектора количества движения уравнением гидростатики.

Сравнительно недавно появился ряд вычислительных схем, названных методом частиц. Их называют также «безсеточными» методами, методами

подвижных конечных элементов, полностью лагранжевы методы, методы на неструктурированных сетках, методы маркеров и так далее (Богомолов С.В., Захаров Е.В., Зеркаль С.В., Кузнецов К.В., Коннор Дж., Бреббиа К., Воробьёв А.П., Афанасьев, К.Е., Евстигнеев Н. М., Liu G.R., Monaghan, J.J., Rodriguez M.X., Bonet J., Kulasegaram S.). Они применяются при численном моделировании процессов газовой динамики и гидродинамики. Существуют также примеры применения метода частиц (наряду с конечно-разностными методами) в теории мелкой воды и при моделировании движения лавинных потоков.

В настоящее время существует большое количество численных математических моделей обвальных, оползневых и селевых процессов (Григорян С.С., Нилов Н.Н., Остроумов А.В., Федоренко В.С., Бийбосунов И., Исманбаев А.И., Евстигнеев Н. М., S.Noelle, J.M.N.T.Gray, K.Hutter).

Анализ существующих на данный момент численных математических моделей селевых и склоновых процессов показал, что для описания движения грунтового потока, возникшего в результате искусственного обвала, необходима разработка новых моделей.

#### **О предмете диссертации.**

Диссертация посвящена численному моделированию движения грунтового потока методом частиц при строительстве плотины Камбаратинской ГЭС-1 взрывообвальным методом.

**Основной целью** настоящей диссертационной работы является математическое моделирование движения грунтового потока на наклонных поверхностях методом частиц при строительстве плотин взрывообвальным способом, а также исследование динамики оползневого процесса.

#### **Основные задачи диссертационного исследования:**

1. Реализовать метод частиц для решения задач динамики оползневых процессов, таких как обвалы, оползни, сели и движение грунтового потока как несжимаемой жидкости.

2. Разработать алгоритм численного решения плоских нелинейных задач динамики грунтовых оползневых процессов и несжимаемой жидкости методом частиц.

3. Провести сравнение численных результатов расчетов, полученных методом частиц, с известными аналитическими решениями и расчетами других авторов.

4. Провести численные эксперименты по выбору оптимальных параметров массы призмы обрушения в зависимости от варьируемых параметров и размеров планируемой плотины Камбаратинской ГЭС-1.

#### **Научная новизна диссертационного исследования:**

1. Представлен и реализован метод частиц для решения задач динамики оползневых процессов, таких как обвалы, оползни, сели и описания движения грунтового потока как несжимаемой жидкости. Обоснована квадратичная аппроксимация давления в пределах частицы-прямоугольника.

2. Разработан алгоритм численного решения плоских нелинейных задач динамики оползневых процессов, а также движения грунтового потока и несжимаемой жидкости методом частиц.

3. На ряде тестовых задач показана эффективность предложенного алгоритма решения нелинейных задач динамики оползневых процессов, движения грунтового потока и несжимаемой жидкости со свободными границами. Проведено сравнение результатов, полученных методом частиц, с известными аналитическими решениями и расчетами других авторов.

4. Проведены в полной нелинейной постановке численные эксперименты по выбору оптимальных параметров массы призмы обрушения в зависимости от варьируемых параметров размера будущей плотины Камбаратинской ГЭС-1.

**Практическая значимость исследования.** Предлагаемый метод строительства плотины является совершенно новым, и в Кыргызстане еще не было построено ни одной плотины ГЭС взрывообвальным способом. Уникальные размеры плотины и зарядов для ее возведения, не встречающиеся в мировой практике, предъявляют особые требования к определению параметров обрушаемой массы с учетом рельефа местности, строения и физико-механических характеристик массива. Важное значение имеет выбор места заложения взрывчатых веществ и их проектное размещение на склоне. Результаты исследований дают возможность для моделирования движения обрушаемой массы горной породы и формирования тела плотины.

Метод частиц, построенный на законе сохранения импульса, дает возможность исследовать задачи динамики оползневых процессов и описать движение грунтового потока и вязкой несжимаемой жидкости со свободными границами, сопровождающиеся сильной деформацией расчетной области, а также получать картину давления, скорости и ускорения на каждом временном слое.

Обоснована возможность возведения плотины будущей Камбаратинской ГЭС-1 взрывообвальным методом на Карабашском створе.

На основе предлагаемой математической модели определены возможные параметры этой плотины.

**Достоверность полученных результатов** следует из корректной математической постановки задачи, а также подтверждается сравнением полученных результатов с известными аналитическими решениями и расчетами других авторов.

**Личный вклад:** Автором разработана модификация метода частиц для моделирования движения грунтового потока, предложен новый метод аппроксимации функции давления в частице. На основе предложенного метода автором создано программное обеспечение для моделирования движения грунтового потока. Используя разработанную компьютерную программу, автор провел численное моделирование и определил оптимальные параметры обрушаемой массы при строительстве плотины взрывообвальным способом.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации доложены на Международной научно-технической конференции «Инновации в образовании, науке и технике», посвященной 100-летию проф. Сухомлинова Г.А. (Бишкек, 2006 г.), Международной научной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды», посвященной 100-летию академика Леонова М.Я. (Бишкек, 2012 г.), Международной конференции «80 лет подготовки инженерных кадров для оборонно-промышленного комплекса и вооруженных сил страны» (Санкт-Петербург, 2012г.), научных семинарах кафедры «Механика» Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова (2008- 2012 гг.).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах. Из них 7 статья опубликована в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий НАК КР.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация изложена на 115 страницах машинописного текста, состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 107 наименований. Иллюстративный материал представлен рисунками и графиками (их общее количество 39).

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** раскрывается актуальность работы, ставятся цель и задачи исследования.

**Первая глава** содержит обоснование использования энергии взрыва для строительства плотин. Выбор створа плотин с учетом перечисленных в главе факторов резко увеличивает эффективность применения предлагаемого взрывообвального метода. Показано, что плотина, созданная взрывообвальным способом с обрушением, в 1,5-2 раза дешевле, чем взрывонабросная и может быть возведена в 1,5-2 раза быстрее. Особенно ценным является такой метод строительства плотин в настоящее время, когда Кыргызская Республика, из-за нехватки средств, не в состоянии самостоятельно приобрести современное оборудование и технику для бетонных и насыпных плотин.

В ряде горных рек Центральной Азии имеются озера, образованные естественными завалами. Высота таких завалов достигает нескольких сотен метров, а объемы завала - сотен миллионов кубометров.

Примерами таких завалов служат озера - Сарезское, Сары - Челек, Кара-Суу, Капка-Таш, Кара-Токо, Ичнакуль, Шавыркуль и др. Естественные завалы в первом приближении можно считать прообразными плотин, создаваемых взрывообвальным способом. По размерам они приближаются к естественным завальным плотинам. Например, размеры Кара-Суйского завала близки к размерам Камбаратинской плотины, намечаемой возвести взрывным способом, высота около 300м, объем завала 260 млн. м<sup>3</sup>. Параметры Сарезкого завала еще больше: высота 800м, объем завала 2,2 млрд.м<sup>3</sup>.

В работе изучен ряд естественных завальных плотин. Естественные завалы в природе встречаются гораздо больше, чем нам известно. Многие завалы со временем смываются водой и поэтому не образуют озера.

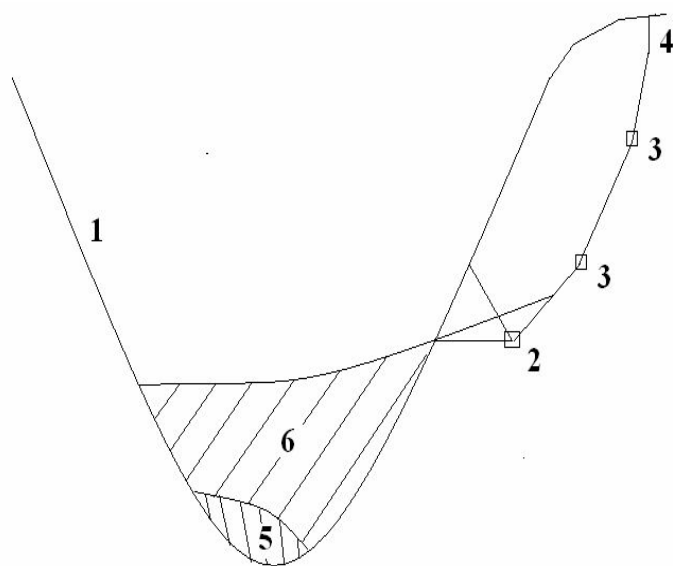
Примерами являются крупнейшие завалы на реке Итагар и Чичкан (притоки реки Нарын).

**Кара-Суйский завал.** Обвалился левый берег с образованием воронки отрыва вытянутой полуэллиптической формы в плане. Видимая длина воронки от вершины до поверхности навала - 1,5 км, ширина - 1,15 км. Путем реконструкции склона удалось обнаружить, что в качестве плоскости скольжения послужил залегающий там слой талька порода малой прочности, мощностью приблизительно 3 м. Со временем река разрушала ущелье и эта плоскость открылась, и предполагаемая масса как бы было «готова» к обрушению. Землетрясение явилось причиной этого завала.

Механизм образования Кара-Суйского завала необходимо было смоделировать в натуральных условиях. С этой точки зрения большую ценность представляют взрывы, проведенные в ущелье Уч-Терек в 1989 году. Взрыв был произведен в узкой V-образной части каньона р. Уч-Терек, подобный условиям створа Камбаратинской ГЭС-1. Линия наименьшего сопротивления нижнего заряда колебалась в зависимости от конфигурации склона от 43 до 55 м (по разным сечениям). Заряд состоял из двух частей (рис. 1): нижнего, рассчитанного на сброс, и верхнего, рассчитанного на рыхление породы.

Нижний заряд, при массе 1495 т, разрушив и вбросив всего 25 % от общего объема призмы обрушения, создал условия для истечения разрыхленного верхним зарядом горной массы. Верхний заряд, с  $W=92$  м,  $Q=803$  т, создавал условия только для потери устойчивого равновесия и разрыхлил верхнюю призму обрушения (объемом 75 % от общего объема).

Таким образом, на практике была реализована идея взрывообвальной плотины, которая в нередки встречается в природе и реализуется в сейсмоопасных горных районах вблизи очагов землетрясений.



*Рис. 1. Поперечный профиль Уч-Терекского опытного взрыва. 1 - склон до взрыва; 2 - заряд сброса; 3 - заряды рыхления; 4 - трещины отрыва; 5 - тело плотины от заряда сброса; 6 - тело плотины от заряда рыхления и обрушения за счет потенциальной энергии силы тяжести.*

Энергия силы тяжести горной массы в процессе лавинообразного движения по склону производит работу по дроблению (путем соударения и т.д.), перемещению и укладке обрушенной горной массы в тело завала (плотины). Метод позволил сократить удельный расход ВВ. Он составил 0,9

кг/м<sup>3</sup> на весь объем сброса и обрушения. Чем больше масштабы обрушения, тем эффективнее данный метод.

**Во второй главе** даются физическая и математическая постановки задачи о движении грунтового потока, а также приводятся результаты расчетов движения жидкости и грунтовых потоков по склону с постоянным и переменным углами наклона. Проведено сравнение задачи о прорыве плотины с численным ее решением. Приводится обзор математических моделей для описания близких по характеру движения грунтовых потоков, селей и снежных лавин.

Модель движения потока основана на гидравлическом подходе (“теории мелкой воды”). Считается, что в начальный момент смещающаяся часть грунтового массива мгновенно дробится и превращается в «жидкость», которая затем «стекает» по склону (движение возникает из состояния покоя) (рис. 2).

Среда, из которой состоит поток, предполагается однородной и несжимаемой, движение турбулентно. Трение входит в уравнения интегрально, в виде трения о дно. Поток взаимодействует с внешней средой только на дне (захват массы, трение). Взаимодействием потока на свободной поверхности с внешней средой пренебрегаем (так как перемешивание практически отсутствует из-за большой разницы в плотностях воздуха и оползневого материала, и трение о воздух мало). Дополнительный захват пород по пути движения мал по сравнению с начальной массой оползня. Предполагается, что нет внешних притоков массы.

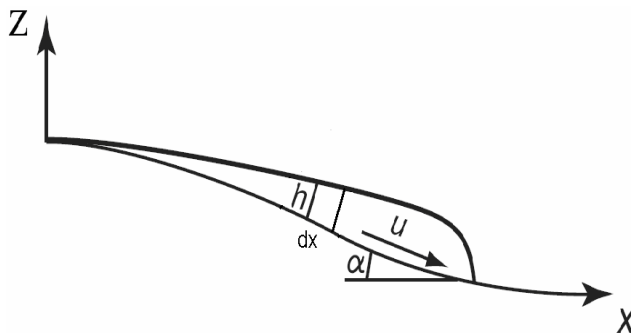


Рис. 2. Схема движения потока по склону.

Рассматриваются только средние по поперечному сечению (по глубине) параметры потока; в качестве искоемых величин выступают глубина потока и средняя скорость вдоль дна. Из уравнений механики сплошной среды на основании ряда гипотез выводится система уравнений, в которую входят только эти величины.

Для описания движения грунтового потока по склону принимается система уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 \\ \frac{du}{dt} = -\left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \tau - g \sin \alpha \right) \end{cases} \quad (1)$$



Здесь  $t$  – время,  $x$  – координата вдоль склона,  $u(x, t)$  – средняя по поперечному сечению потока скорость вдоль склона,  $p(x, t)$  – давление,  $h(x, t)$  – высота (мощность) потока, отсчитываемая перпендикулярно поверхности склона,  $\alpha(x)$  – угол наклона склона к горизонту,  $\tau$  – проекция силы трения на ось  $x$ .

Приняв  $D = \frac{1}{h} \frac{dh}{dp}$  и, подставив в уравнение системы (1), получим систему

уравнений в давлениях

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} + p \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \tau + g \sin \alpha \end{cases} \quad (2)$$

Математическое моделирование движения грунтового потока приводит к дискретизации неизвестных функций. В данной диссертационной работе был выбран **метод частиц**. Каждая частица имеет набор атрибутов, таких как масса, положение, мощность и скорость. Состояние физической системы определяется атрибутами конечного ансамбля частиц, а эволюция системы определяется законами взаимодействия этих частиц.

Разрывность решений уравнений затрудняет применение разностных схем и накладывает определенные требования для соблюдения консервативности. Поэтому метод частиц, не требующий гладкости решения и возможность использования неравномерной сетки, становится достаточно эффективным. Особенность, которая делает модели частиц привлекательными с вычислительной точки зрения, состоит в том, что ряд атрибутов частицы сохраняется, и поэтому их не надо изменять, когда вычислительная модель развивается во времени.

С математической точки зрения метод основан на представлении тела совокупностью взаимодействующих частиц-прямоугольников (материальных точек или твердых тел), описываемых законами классической механики. Выбранный метод дискретизации трансформирует уравнения модели. Вводим набор частиц с координатами  $x_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, N$  (рис. 3). В одномерном случае частицы имеют форму прямоугольников.

Если угол между горизонтом и осью симметрии частицы равен  $\alpha$ , то закон сохранения импульса для  $i$ -частицы можем записать

$$\left( \frac{du}{dt} \right)_i = - \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \sin \alpha + \tau \right)_i \quad (3)$$

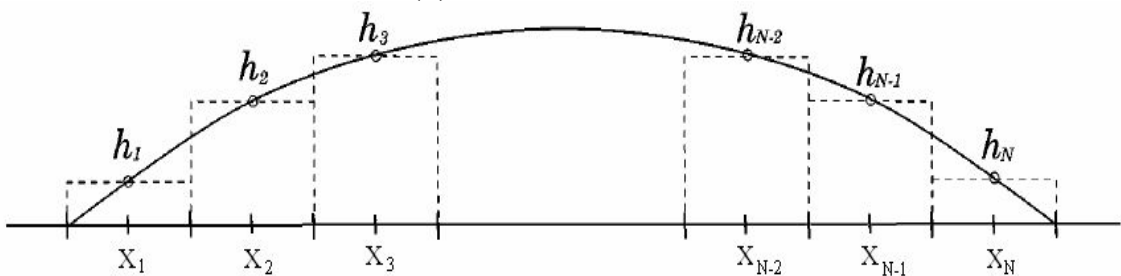


Рис.3. Аппроксимация частиц-прямоугольников произвольной параболой. Точками обозначены центры частиц.

Важным моментом является тот факт, что частицы-прямоугольники соприкасаются друг с другом (они не перекрывают друг друга и не образуют пустот между собой). Также соблюдается принцип сохранения симметрии частиц и середины основания прямоугольников являются координатами частиц.

Для потоков, содержащих глину и камни типа селей и глинистых растворов, Эглит М.Э. рекомендует формулы вида:

$$\tau = \text{sign}(u)(k_2 u^2 + gk_c \cos \alpha)$$

Для расчета конкретных вариантов движения потоков различной природы (водного, селевого или оползневого) по склону задаются числовые значения коэффициентов кулоновского трения  $k_c$ , и трения  $k_2$ , а также геометрические характеристики склона, определяемые функциями  $\alpha(x)$ ,  $h_o(x)$ ,  $u_o(x)$ .

Григорян С.С. заметил, что значения параметров  $k_c$ ,  $k_2$ , изменчивы в процессе движения обвала или оползня, однако из-за отсутствия данных о закономерностях этих изменений, в расчетах они считаются константами, не зависящими от  $x$  и  $t$ . В работах Григоряна С.С. предлагается следующий диапазон изменений для  $k_c$ :  $0,55 \leq k_c \leq 0,85$ , и для  $k_2$ :  $0,01 \leq k_2 \leq 0,1$ .

Давление потока на интервале  $x_1 \leq x \leq x_2$  аппроксимируем параболой

$$p(x,t) = p(q,t) + (x - q) \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=q} + \frac{(x - q)^2}{2} \left. \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right|_{x=q} \quad (4)$$

Продифференцировав уравнение системы (3) (при  $\tau - g \sin \alpha = 0$ ), получим

$$\begin{cases} p \frac{d^2 p}{dt^2} - 2 \left( \frac{dp}{dt} \right)^2 + p^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{du}{dt} \right) = 0 \\ \frac{d^2 p}{dx^2} = -\rho \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{du}{dt} \right) \end{cases} \quad (5)$$

Используя подстановку  $p = s/z$ , где  $S$  - некая постоянная,  $Z$  - ширина частицы-прямоугольника, из (5) получим

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = z \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{du}{dt} \right). \quad (6)$$

Область частицы – прямоугольника мысленно разбивается на большое число элементарных частиц, плоскими сечениями (рис. 4). Каждой частице соответствуют свои значения ускорения. Распределение ускорений вдоль оси частицы – прямоугольника в каждый момент непрерывно, поэтому в двух близких друг к другу частицах ускорения мало разнятся между собой.

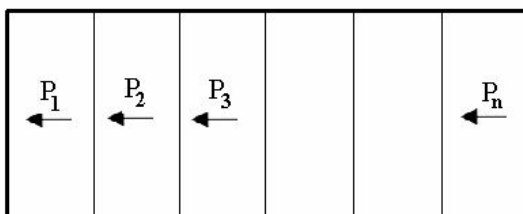


Рис. 4. Частица – прямоугольник

разбивается на элементарные частицы.

Тогда движение рассматривают как совокупность непрерывно следующих друг за другом элементарных частиц, причем каждая последующая частица перемещается, возмущенная предыдущими частицами. При этом сила инерции в сечениях частицы складывается из сил инерции его элементарных частиц как бы последовательно; более удаленные от центра частицы "давят" на более близкие.

Силы инерции частицы будут складываться, и образовывать одну силу – силу инерции частицы – прямоугольника. Проинтегрировав (6) вдоль частицы, получим

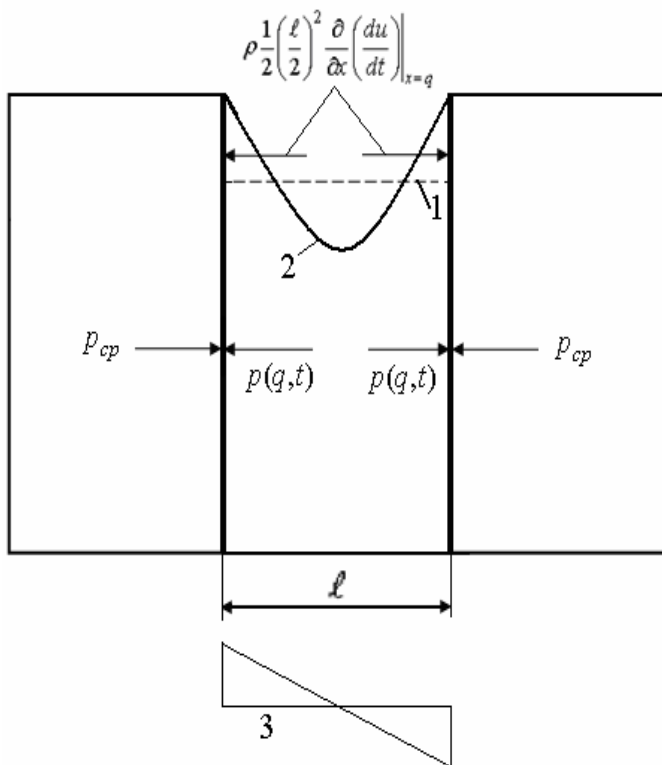
$$\rho \int_0^{x-q} \frac{d^2 z}{dt^2} dz = \rho \frac{(x-q)^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{du}{dt} \right) \Big|_{x=q} \quad (7)$$

Подставляя (7) в (4), и с учетом второго уравнения системы (5), получим

$$p(x,t) = p(q,t) - \rho(x-q) \frac{du}{dx} \Big|_{x=q} - \rho \frac{(x-q)^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{du}{dt} \right) \Big|_{x=q}$$

Определяя давление на границах частицы - прямоугольников (на левом конце  $x-q = -\ell/2$  и правом -  $x-q = \ell/2$ ) и, складывая их получим

$$\rho \frac{1}{2} \left( \frac{\ell}{2} \right)^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{du}{dt} \right) \Big|_{x=q} = p(q,t) - \frac{p(-\ell/2,t) + p(\ell/2,t)}{2} = p(q,t) - p_{cp} \quad (8)$$



частице, 3- график ускорения частицы.

Выражение в левой части уравнения (8)

$\rho \frac{1}{2} \left( \frac{\ell}{2} \right)^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{du}{dt} \right) \Big|_{x=q}$  есть сумма сил

инерции в частицах, которые уравнивают лишнее давление  $p(q,t) - p_{cp}$  на соседних частицах - прямоугольниках (см. рис. 5). Ускорения в частицах должны быть такими, чтобы силы инерции, вызванные этими ускорениями, уравновесили бы давление  $p(q,t) - p_{cp}$

Рис.5. Взаимодействие частиц. 1- уровень средней частицы, 2- кривая давления на средней

Закон сохранения импульса с учетом внешних сил имеет вид

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \alpha - \text{sign}(u)(k_2 u^2 + gk_c \cos \alpha)$$

Продифференцировав последнее уравнение, после преобразований, получим

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \text{sign}(u) \left( k_2 2u \frac{\partial u}{\partial x} - gk_c \sin \alpha \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) + g \cos \alpha \frac{\partial \alpha}{\partial x} \quad (19)$$

Таким образом, давление в частице во время неустановившегося движения определяется из трех оставляющих:

1. Статическое давление  $p(q,t) = \rho gh(q,t) \cos \alpha$ . Это статическое давление, оно во всех сечениях частицы-прямоугольника одинаково.
2. Вторая слагаемая - есть давление на сечениях частицы-прямоугольника от силы инерции, вызванной разностью давлений в соседних частицах. Разность давлений в соседних частицах средней частице-прямоугольнику сообщает ускорение. Ускорения во всех сечениях частицы-прямоугольника будут одинаковыми. Складывая силы инерции в элементарных частицах в частице-прямоугольнике, получим силу инерции.
3. Третья слагаемая - есть сумма сил инерции в частицах, которые уравновешивают лишнее давление  $p(q,t) - p_{cp}$  на соседних частицах - прямоугольниках. Когда соседние частицы давят, в средней частице возникают ускорения. Силы инерции от этих ускорений уравновешивают действие соседних частиц. Давление в средней частице имеет форму параболы. Ускорения частицы определяются прямой и они симметричны относительно средней точки. Это давление вызывает изменение размеров частицы.

#### **Алгоритм моделирования движения грунтового потока на наклонной поверхности:**

1. Задается цифровая модель рельефа, размеры воронки взрыва и поверхность скольжения возможной призмы обрушения.
2. Задаются начальные и граничные условия (такие характеристики потока, как скорость  $u_0$  и давление  $p_0$ ).
3. Необходимы также данные о физических свойствах вещества потока - плотности  $\rho$ , коэффициенте кулоновского трения  $k_c$ , коэффициенте трения  $k_2$ .
4. Дискретизация призмы возможного обрушения на частицы - прямоугольники (задание  $h_i$  и  $u_i$ ).
5. Вычисление ускорения частицы - прямоугольников  $a_i(t)$  по формуле

$$a_i = \left( \frac{du}{dt} \right)_i = \left( -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \alpha - \text{sign}(u)(k_2 u^2 + gk_c \cos \alpha) \right)_i.$$

6. Вычисление дополнительного давления на частице - прямоугольнике, вызванного действием соседних частиц

$$\frac{1}{2} \left( \frac{z_i}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \Big|_i = p(q,t) - p_{cp}(t)$$

7. Определение производной ускорения на частице-прямоугольнике

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \text{sign}(u) \left( k_c 2u \frac{\partial u}{\partial x} - g k_c \sin \alpha \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) + g \cos \alpha \frac{\partial \alpha}{\partial x}$$

8. Определение ускорения на границах частиц-прямоугольников

$$A_{\pm}(t) = a(t) \pm \frac{z}{2} \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{du}{dt} \right)$$

(+ правая граница, - левая граница).

9. Определение скорости:

- на границах частицы  $U_{\pm}(t + dt) = U_{\pm}(t) + A_{\pm}(t) * dt$

- в центре частицы  $u(t + dt) = (U_{+}(t + dt) + U_{-}(t + dt)) / 2$

10. Координаты центров и границы частиц-прямоугольников определяются по формулам:

$$x(t + dt) = x(t) + u(t) * dt, \quad X_{\pm}(t + dt) = X_{\pm}(t) + U_{\pm}(t) * dt$$

Здесь  $X_{\pm}$  - координаты правой и левой границы частицы.

11. Изменение высоты потока определяется из уравнения неразрывности

$$\frac{dh}{dt} = -h \frac{\partial u}{\partial t} = -h(t) \frac{U_{+}(t) - U_{-}(t)}{dt} \quad \text{отсюда} \quad h(t + dt) = h(t) + dh$$

12. Проверка времени вычисления, если  $t \leq T$  вычисление продолжается, вернувшись на шаг 5, в противном случае вычисление останавливается.

13. Получение необходимых выходных данных.

14. Конец.

Основными выходными параметрами являются распределение высоты и скорости потока во времени, а также величина пройденного пути, как наиболее важные характеристики любого склонового процесса.

### Тестирование программы на модельных задачах.

**1. Задача о разрушении плотины.** Горизонтальный канал постоянного поперечного сечения, простирающийся до бесконечности в обе стороны, имеет тонкую перегородку в сечении  $x = x_1$ . При  $x < x_1$  вода имеет глубину  $h_1$ , а при  $x > x_1$  - глубину  $h_0 = 0$ . Первоначально вода предполагается покоящейся. В момент времени  $t = 0$  плотина внезапно разрушается. Численное решение задачи о разрушении плотины, полученное предложенным нами методом, представлено на рис. 6. На графиках изображены значения скоростей  $u$  прямоугольника-частицы, отвечающие за уровень жидкости  $h$ . Плотина находится в точке с координатой  $x = 10$ . Число частиц  $N = 10$ , т.е. расстояние между частицами в начальный момент времени равно 1. На графике показано решение с шагом  $\tau = 0,01$  с.

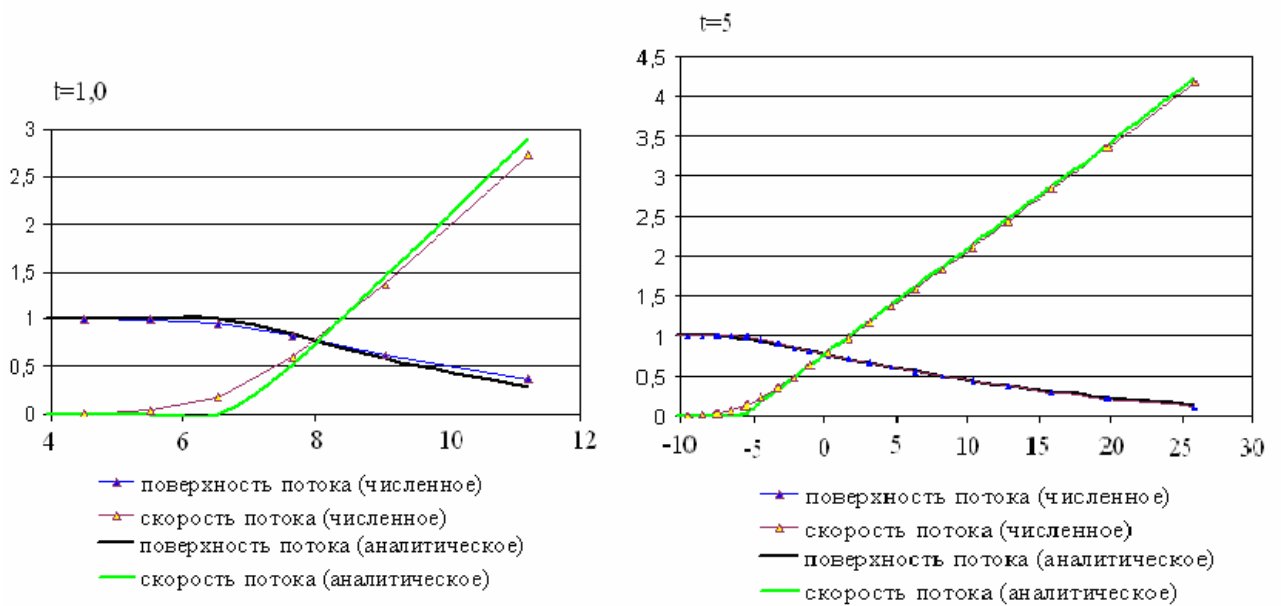


Рис.6. Изменение высоты и скоростей потока, при  $h=1$ ,  $l=1$ .

Численные расчеты показывают, что при малых значениях  $t$  численные и аналитические расчеты намного отличаются (рис.6), с увеличением  $t$  результаты постепенно совпадают. Теория мелкой воды, строго говоря, несправедлива в начальной стадии. Поскольку характерная длина по горизонтали мала, но по мере развития течения величина  $h_0^2 / l^2$  становится малой, и реальное течение описывается довольно хорошо. Также показано, что уменьшение ширины частицы повышает точность решения задачи (см. рис. 6 и 7).

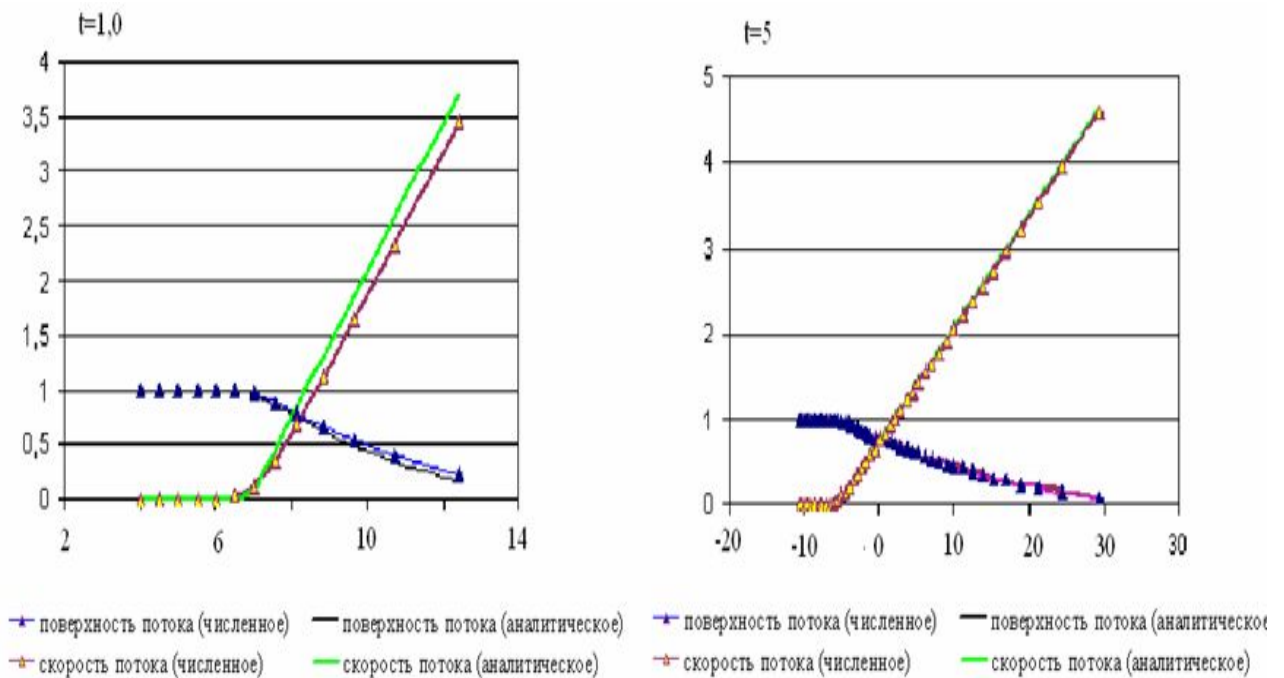


Рис.7. Изменение высоты и скоростей потока, при  $h=1$ ,  $l=0,5$ .

**2. Движения жидкости (воды) при постоянном наклоне склона.** При  $x < 0$  вода имеет глубину  $h_0$ , а при  $x > 0$  – глубину  $h_l = 0$ . Результаты сравнения решения предложенным методом с аналитическими решениями представлены на рис. 8.

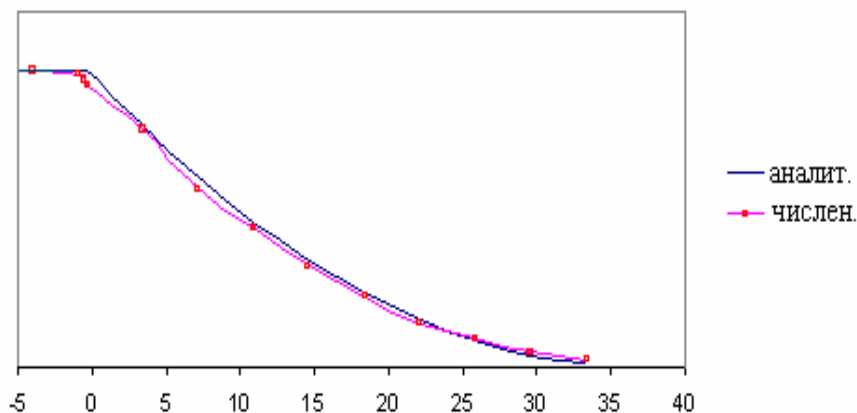


Рис. 8. Уровень воды для момента времени  $t=4$  с при угле склона  $\alpha=24,7^\circ$

**3. Движения грунтового потока по склону с переменным углом наклона.**

Приведем результаты расчета движения грунтового потока по склону с переменным углом наклона (рис. 9). Максимальное значение угла наклона склона к горизонту  $\alpha_{max} = 40^\circ$ , минимальное значение  $\alpha_{min} = 5^\circ$ .

Коэффициенты трения принимали значения  $k_C = 0,42$ ,  $k_T = 0,13$ , шаг по времени брался равным  $\tau = 0,01$ , количество частиц  $N = 30$ , первоначально вся масса оползня была расположена в области  $0 \leq x \leq 35$  м. На рис. 8 дано распределение грунта в оползне-потоке для моментов времени – 0; 29,9 мин. Момент времени 29,9 мин. соответствует остановке потока, когда в основной массе грунтового потока скорость равна нулю. За 29,9 мин. грунтовой поток прошел расстояние в 247 м, высота потока уменьшилась с 17 м (в начальный момент) до 3,94 м.

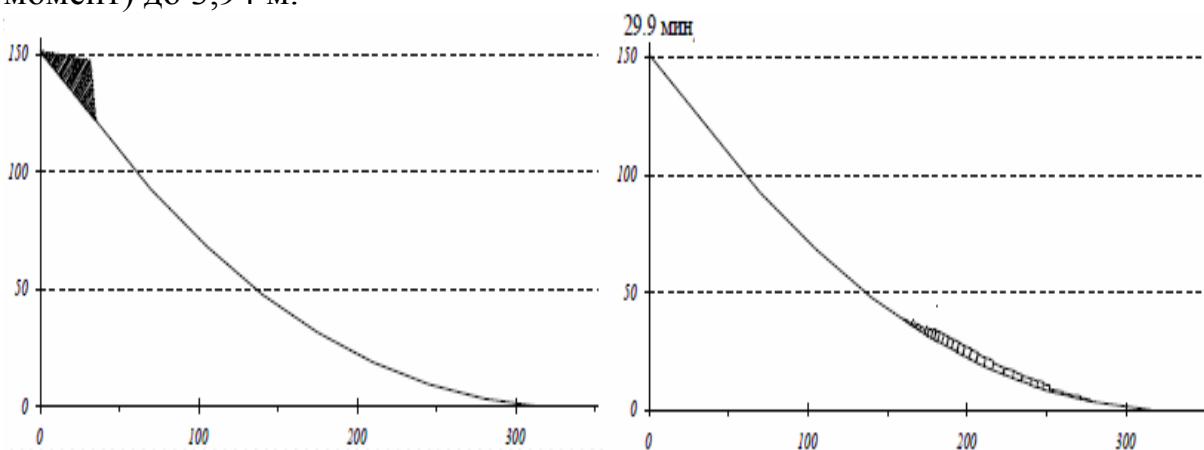


Рис.9. движения оползня-потока по склону с переменным углом наклона.

**Третья глава** посвящена исследованию параметров взрывообвальной плотины с привязкой к Камбаратинской ГЭС-1 на Карабашском створе с учетом природных и масштабных факторов, обеспечивающих безопасность и эффективности нового метода.

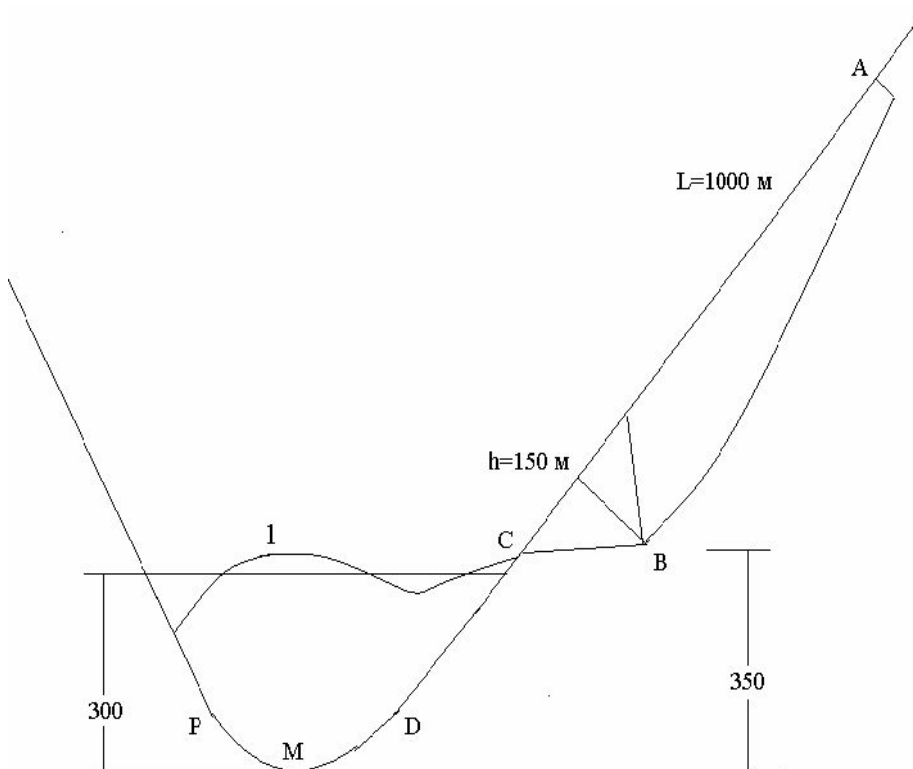
Первый параграф посвящен исследованию качественных особенностей действия зарядов на склонах по сравнению с горизонтальной поверхностью. Эти особенности предопределяются геометрией склона, благодаря которому изменяется роль силы тяжести как в развитии и подъеме купола взрыва, так и в обрушении консоли над воронкой.

Второй параграф главы посвящен определению параметров обрушаемой массы. Процесс взрыва не рассматривается. Полагаем, что взрывом определяется начальная форма обрушаемой массы. Практика показывает, что массив обрушения зависит от глубины  $h$  и мощности заряда  $Q$ . Задав объем плотины, определим зависимость длины призмы обрушения от глубины заложения заряда и формы возможной призмы обрушения. Правый борт каньона имеет угол наклона в пределах 50 градусов, а левый борт - от 40 до 50 градусов (рис. 10). По проекту глубина заложения зарядов достигает 260 метров.

В результате численных экспериментов установлено, что, если глубина заложения равна 150 метрам и длина призмы обрушения составляет 1000 метров, то скорость потока будет достаточной, чтобы обрушенная масса набрала необходимую высоту.

После взрывов, обрушенная масса распространяется достаточно быстро. Расчеты показывают, что в первые секунды движения породы резко увеличиваются скорости частиц на переднем фронте.

С течением времени увеличивается «хвост» потока: уменьшается высота и увеличивается длина потока. На рис. 11 представлен график изменения скорости потока по длине, а также ее высота при  $t = 1$  мин. На переднем фронте скорость составляет около 7 м/с. Коэффициент трения  $K_c = 0,4$ .



*Рис.10. Геометрия призмы обрушения.  $h$  - глубина заложения заряда;  $L$  - длина призмы обрушения. 1-форма плотины, образованная взрывообвальным способом.*



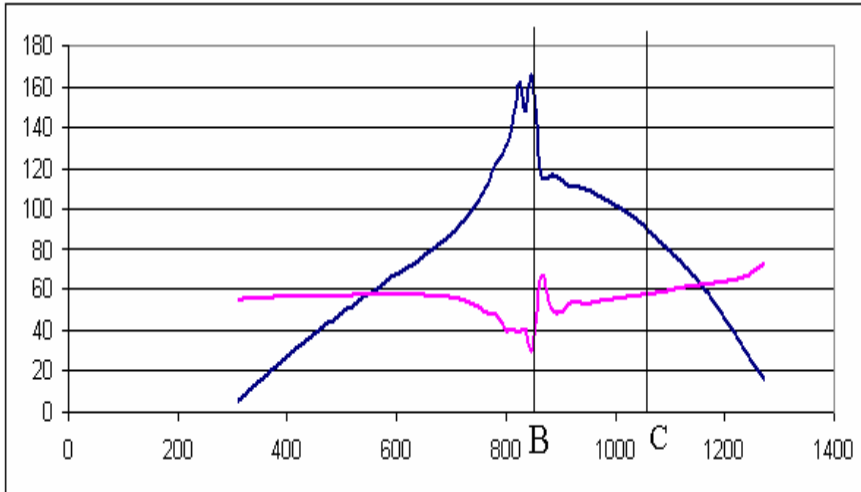


Рис.11. Толщина потока ( $h$ ), и скорости частиц ( $u$ ) (значения скоростей умножена на 10) при  $t = 1$  минуте.

На участке ВС (на поверхности взрыва) угол наклона мал, поэтому скорость потока падает, т. е. происходит торможение потока. Из-за этого высота потока перед этим участком наибольшая. Далее скорость потока увеличивается, а ее высота уменьшается. Дойдя до противоположного борта (рис.12), обрушенная масса затормаживается, теряет скорость (участок DP) и начинается сползание его по склону вдоль долины. Если скорость достаточно большая, то высота плотины на противоположном борте будет больше, чем на обрушаемом борту. При этом обрушаемая масса «течет» как тяжелая жидкость (типа меда) по уклону. То же самое происходит с обрушенной массой по верхнему и нижнему бьефу навала (плотины).

Исследование влияние коэффициента трения на характер движения грунтового потока представлены на рис.13, 14, 15. Из этих рисунков видно, что коэффициент трения влияет на скорость и высоту потока. С увеличением коэффициента трения скорость уменьшается, также время до остановки потока увеличивается. Как только передний фронт потока перейдет на противоположную сторону склона скорость потока начинает уменьшаться.

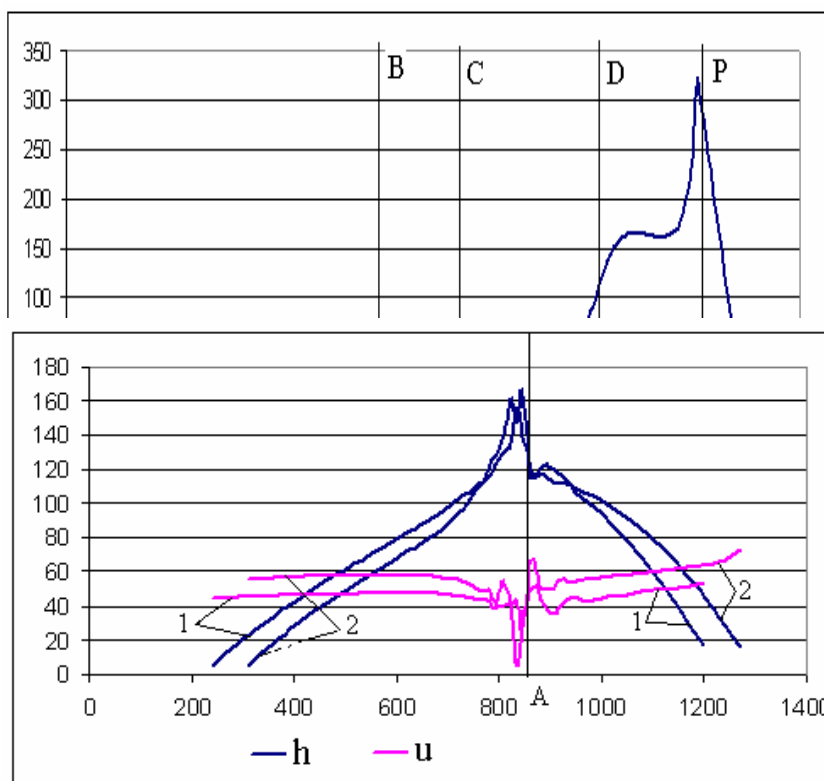
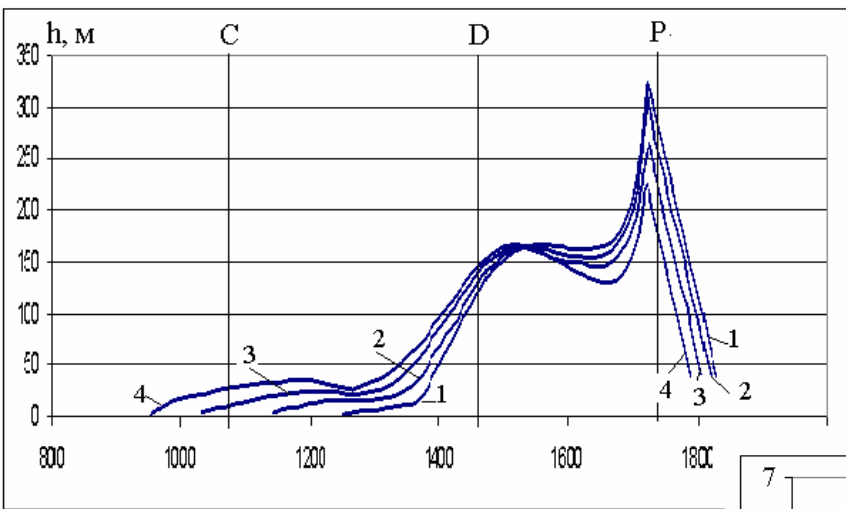


Рис.12. Толщина потока ( $h$ ), и скорости частиц ( $u$ ) (значения скоростей умножены на 10) при  $t = 5$  минутам.

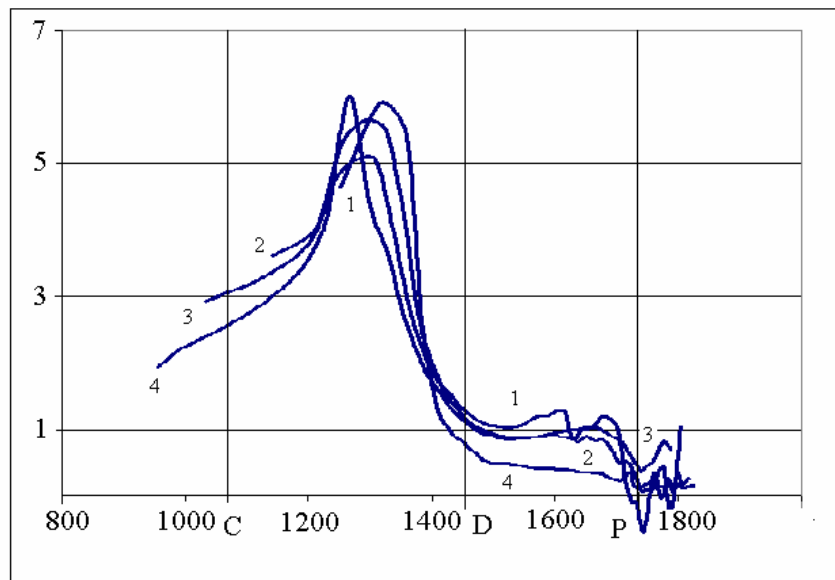
Рис.13. Изменение мощностей ( $h$ ) и

скоростей ( $u$ ) потока при разных коэффициентах трения  
(1-  $k_c=0$ ; 2- $k_c=0,3$ ) при  $t = 1$  минуте.



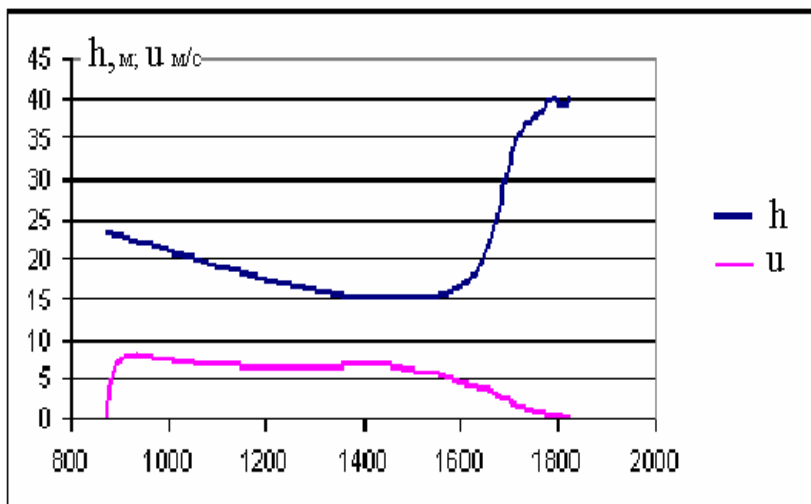
1- $k_c=0,0$ ; 2- $k_c=0,1$ ; 3- $k_c=0,2$ ; 4- $k_c=0,3$

Рис.15. Изменение скоростей потока ( $u$ ) при разных коэффициентах трения ( $k_c=0;0,1; 0,2; 0,3$ ),  $t=280$  сек.



1- $k_c=0,0$ ; 2- $k_c=0,1$ ; 3- $k_c=0,2$ ; 4- $k_c=0,3$

На рис. 16 построен график изменения скорости и высоты переднего фронта. Из рисунка видно, что на участке CD, где поверхность уменьшается, частицы



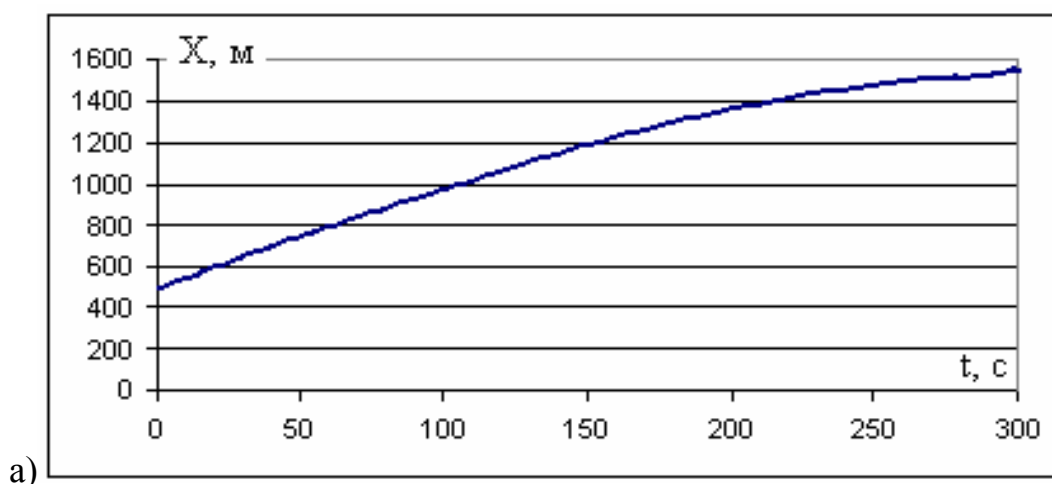
грунтового потока ускоряются за счет давления его хвостовой части, после этого передняя часть потока затормаживается.

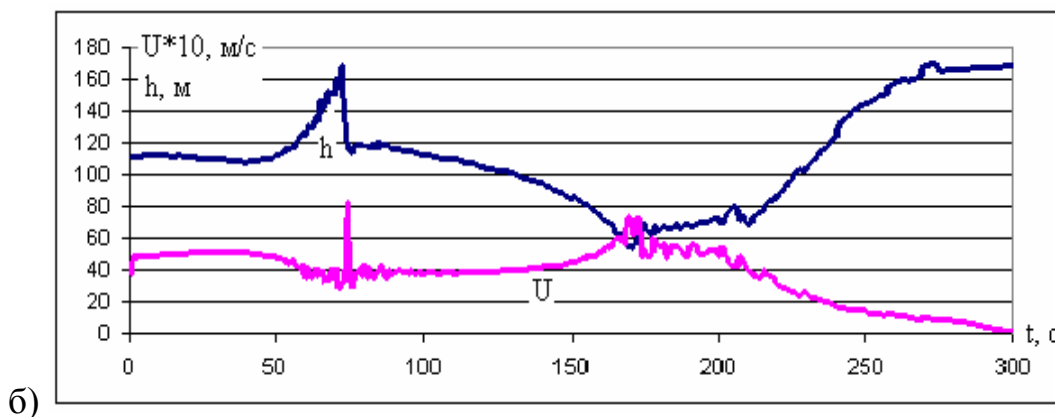
Рис. 16. Изменение скоростей ( $u$ ) высоты ( $h$ ) переднего фронта.

На этом участке скорости частиц потока наибольшие, чем на других участках. Как только передний фронт потока перейдет на противоположную сторону склона, скорость потока начинает уменьшаться. Она будет уменьшаться за счет действия объемного веса грунта. При этом высота увеличивается и через некоторое время передний фронт остановится.

На рис. 17 представлены характеристики движения центра масс грунтового - потока. Грунтовый поток распространяется достаточно быстро. В первые секунды расчета резко увеличивается скорость центра грунтового потока.

С течением времени увеличивается скорость грунтового потока, уменьшаются высоты, увеличивается длина каждой частицы, и потока, как общего целого. К 73-ей секунде расчета центр массы потока достигает точки (В) и после перехода этой точки, где направление поверхности резко меняется, скорость центра массы резко возрастает. Это, в свою очередь, уменьшает высоту центра потока. Далее видно, что увеличивается скорость движения, а высота потока уменьшается. Как только передний фронт потока переходит на противоположный борт, скорость центра массы начинает падать. Через 5,1 минуты, центр массы грунтового потока достигает глубины каньона и останавливается.





*Рис.17. Распределение координат (а), высот и скоростей (б) центра масс грунтового потока в системе координат, связанной со склоном за все время расчета.*

На рис. 10 видно, что обрушенная масса достаточно хорошо набрала необходимую высоту, и неплохо приблизилась к проектной высоте плотины. Все эти результаты подтверждают необходимость проведения моделирования для выбора оптимальных параметров обрушаемой массы.

Уменьшая глубину заложения взрывчатого вещества можно достичь ее экономии. Увеличение длины потока позволяет повысить ее скорость. Это, в свою очередь, повышает дробимость и плотность горных пород в теле плотины.

Хотелось еще раз отметить новизну данной работы. Она состоит в развитии и применении варианта метода частиц к моделированию движения потоков различной природы по склоновым поверхностям. Интерес и актуальность данной проблемы определяется важностью решаемых задач и тем, что в настоящее время предпринимаются немалые усилия для решения подобных задач различными вариантами метода частиц.

Предлагаемый метод строительства плотины является совершенно новым. Кыргызстан пока еще не построил ни одной плотины ГЭС взрывообвальным способом. Уникальные размеры плотины и зарядов для ее возведения предъявляют особые требования к определению параметров обрушаемой массы. При этом необходимо учитывать рельеф местности, строение и физико-механические характеристики массива, а также правильно выбрать место заложения взрывчатого вещества при проектировании и их размещении на склоне. Масштаб будущего строительства вызывает необходимость проведения экспериментов для решения вышеперечисленных задач. В данной работе с помощью компьютерного моделирования проведены численные эксперименты по выбору параметров обрушения. В диссертационной работе показана эффективность применения компьютерного моделирования для решения задач строительства плотины ГЭС взрывообвальным способом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Главная задача взрыва заключается в том, чтобы вывести горный массив на склоне из состояния равновесия. Вся остальная работа по дроблению, перемещению и укладке горной массы в тело плотины можно возложить на освобожденную потенциальную энергию силы тяжести горных пород склона.

2. Предварительные расчеты показывают, что плотина, созданная взрывообвальным способом с обрушением, в 1,5-2 раза дешевле, чем взрывонабросная и может быть возведена в 1,5 раза быстрее. Особенно ценным является такой метод строительства плотин в настоящее время, когда Кыргызская Республика, из-за нехватки средств, не в состоянии самостоятельно приобрести современное оборудование и технику для бетонных и насыпных плотин.

3. Для практического использования идеи природных аналогов при строительстве плотин Камбаратинской ГЭС-1 был выполнен опытный взрыв на речке Уч-Терек. Уч-Терекская взрывообвальная плотина оказалась дешевле в 2 раза и возведена в 1,5 раза быстрее по сравнению с Бурлыкской взрывонабросной плотинной. Тем самым было доказано целесообразность возведения плотины Камбаратинской ГЭС-1 взрывообвальным способом. С увеличением масштаба явления эффективность данного метода еще больше возрастает.

4. Представлен и реализован метод частиц для решения задач динамики оползневых процессов (таких как обвалы, оползни, сели) и несжимаемой жидкости. Обоснована квадратичная аппроксимация давления в пределах частицы-прямоугольника.

5. Разработан алгоритм численного решения плоских нелинейных задач динамики оползневых процессов и несжимаемой жидкости методом частиц.

6. На ряде тестовых задач показана эффективность предложенного алгоритма для решения нелинейных задач динамики оползневых процессов и движения несжимаемой жидкости со свободными границами. Проведено сравнение результатов численных расчетов, полученных методом частиц с известными аналитическими решениями и расчетами других авторов.

7. Проведены в полной нелинейной постановке численные эксперименты по решению задач о выборе оптимальных параметров массы призмы обрушения в зависимости от варьируемых параметров и размеров строящейся плотины.

8. Предложенную модель можно использовать для исследования движения снежных лавин, оползней и селевых потоков. Разработанная методика с необходимой точностью позволяет решать широкий круг задач со сложным рельефом местности. Математические модели на основе численного интегрирования уравнений гидродинамики позволяют адекватно описывать нестационарную динамику грунтового потока на сложном рельефе. Компьютерное моделирование дает возможность определять поле скоростей, форму плотины и время ее образования.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Сарбалиев А.Ш. Моделирование движения грунтовых потоков на наклонных поверхностях [текст]// Сарбалиев А.Ш.Дуйшеналиев Т.Б., Мекенбаев Б.Т., Барсанаев С.Б. Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек 2009 г., №17. Стр.374-376.
2. Сарбалиев А.Ш. Численное моделирование движения потока [текст]//Сарбалиев А.Ш. Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек 2010 г., №21. Стр.117-123.
3. Сарбалиев А.Ш. Физическая модель движения грунтового потока [текст]// Сарбалиев А.Ш. Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек 2010 г., №21. Стр.114-117.
4. Сарбалиев А.Ш. Выбор оптимальных параметров обрушаемой массы при строительстве плотины взрывообвальным способом [текст]// Сарбалиев А.Ш. Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек 2012 г., №26. Стр.110-112.
5. Сарбалиев А.Ш. Уравнение для прогнозирования условий разрушения горных пород при высоких давлениях [текст]// Сарбалиев А.Ш. Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек 2012 г., №26. Стр.114-117.
6. Сарбалиев А.Ш. Аппроксимация давления грунтового потока в методе частиц [текст]// Сарбалиев А.Ш. Международной научной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды», посвященной 100-летию академика Леонова М.Я. Бишкек 2012г.,Стр. 328-334.
7. Сарбалиев А.Ш. Моделирование движения грунтового потока при строительстве гидротехнических сооружений взрывообвальным методом // Труды международной конференции «80 лет подготовки инженерных кадров для оборонно- промышленного комплекса и вооруженных сил страны». Санкт-Петербург, 2012г.

## РЕЗЮМЕ

**диссертации Сарбалиева Анарбая Шаботоевича на тему: «Моделирование движения грунтового потока при строительстве плотины взрывообвальным методом (на примере плотины Камбаратинской ГЭС -1)» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела**

**Ключевые слова:** взрывообвальным способ, плотина, движение грунтового потока, теория мелкой воды, метод частиц, численные модели, несжимаемая жидкость, скорость, ускорение, давление, физическая модель, дифференциальное уравнение неустановившегося движения, уравнения равновесия потока, уравнение неразрывности, дискретизация потока, аппроксимация давления, силы трения, алгоритм решения, модельные задачи,

*разрушение, вязкая жидкость, склон, призма обрушения, скорость частиц, передний фронт, скорость и высота потока, центр грунтового потока, компьютерное моделирование, численные эксперименты.*

Диссертация посвящена численному моделированию движения грунтового потока методом частиц при строительстве будущей плотины Камбаратинской ГЭС-1 взрывообвальным способом.

Реализован метод частиц для решения задач динамики оползневых процессов (таких как обвалы, оползни, сели) и несжимаемой жидкости. Разработан алгоритм численного решения плоских нелинейных задач динамики оползневых процессов, обвалов и несжимаемой жидкости методом частиц.

На тестовых задачах показана эффективность предложенного алгоритма решения нелинейных задач динамики оползневых процессов и движения несжимаемой жидкости со свободными границами. Проведено сравнение результатов численных расчетов, полученных методом частиц с известными аналитическими решениями и расчетами других авторов.

Проведены в полной нелинейной постановке численные эксперименты по решению задачи о выборе оптимальных параметров массива породы призмы обрушения в зависимости от варьируемых параметров и размеров будущей плотины Камбаратинской ГЭС-1.

**01.02.04-«Деформациялануучу катуу телонун механикасы» адистиги боюнча техникалык илимдердин кандидаты окумуштуулук даражасына талапкер Сарбалиев Анарбай Шаботоевичтин «Жардыруу жолу менен плотинанын курулушунда жер астындагы агымдын кыймылын моделдештирүү (Камбарата-1 ГЭСинин плотинасынын мисалында) деген темадагы диссертациясынын**

### **РЕЗЮМЕСИ**

**Маанилүү сөздөр:** каптатып жардыруу жолу, плотина, жер астындагы агымдын кыймылы, тайыз суунун теориясы, бөлүкчөлөрдүн усулдары, сандык моделдер, кысылбаган суюктук, ылдамдык, басымды күчөтүү, физикалык модель, калыпка келе кыймылдын дифференциалдык теңдемеси, агымдын тең салмактуулугунун теңдемеси, үзгүлтүксүз теңдемеси, агымдын дискретизациясы, басымдын аппроксимациясы, сүйкөлүү күчтөрү, чечимдин алгоритмасы, моделдүү тапшырмалар, кыйроо, жабышкак суюктуктар, кыя, кыйроонун призмасы, бөлүкчөлөрдүн ылдамдыгы, алдыңкы фронт, агымдын бийиктиги жана ылдамдыгы, жер астындагы агымдын борбору, компьютердик моделдештирүү, сандык эксперименттер.

Диссертациялык иш Камбарата-1 ГЭСинин келечектеги плотинасынын курулушунда жардыруу жолу менен жер астындагы агымдын кыймылын бөлүкчөлөрдүн методу менен сандык моделдештирүүгө арналган. Көчкүлөрдүн жүрүшүнүн динамикасын (көчкүлөр, селдер жана кулап түшүү сыяктуу) жана кысылбаган суюктуктарды аныктоо үчүн бөлүкчөлөр методу

ишке ашырылган. Көчкү процесстеринин динамикасынын сызыктарга тушталбаган жалпак сандык чечүүнүн алгоритмасы иштелип чыккан.

Тест ташырмаларында сунушталган көчкү процесстеринин динамикасынын эркин чектеринде сызыктарга тушталбаган жалпак сандык чечүүнүн алгоритмасынын эффективдүүлүгү көрсөтүлгөн. Бөлүкчөлөр методу менен белгилүү аналитикалык жана башка авторлордун ачылыштарынын негизинде алынган сандык эсептөөлөрдүн салыштыруу жүргүзүлгөн.

Камбарата-1 ГЭСинин келечектеги плотинасынын чамаланган көлөмү жана параметрлерине баш ийген жер алдындагы кендердин кыйроо призмасынын оптималдуу көлөмүн тандоонун тапшырмаларын чечүү боюнча толук сызыктарга тушталбаган сандык эксперименттер өткөрүлгөн.

### Summary

**of dissertation of Sarbaliev Anarbay Shabotoevich on theme "The simulation of groundwater flow in the construction of the dam explosion collapse method (for example: dam Kambarata-1)" for the degree of candidate of technical sciences, speciality 01.02.04 - Mechanics of deformable solids**

Keywords: explosion collapse way, dam, ground water flow, shallow water theory, particle method, numerical models, incompressible fluid, velocity, acceleration, pressure, physical model, a differential equation of unsteady flow, the equations of equilibrium flow, the continuity equation, sampling flow approximation pressure, friction, solution algorithm, model problems, destruction, viscous liquid, slope, sliding wedge, the velocity of the particles, the leading edge, the speed and the height of the flow, the center of groundwater flow, computer simulation, numerical experiments.

Dissertation is about the numerical modeling of groundwater flow by the movement of particles in the construction of the future dam Kambarata-1 explosion collapse way.

Implemented particle method for solving the dynamics of landslide processes (such as rock falls, landslides, mudflows) and incompressible fluid. Developed an algorithm for the numerical solution of flat nonlinear problems of the dynamics of landslides processes, avalanches and incompressible fluid by the particles.

On test problems demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm for solving nonlinear problems of the dynamics of landslide processes and flow of an



incompressible fluid with free boundaries. The comparison of numerical results obtained by the particles with known analytic solutions and calculations of other authors.

Held in the fully nonlinear formulation numerical experiments to address the problem of choosing the optimum parameters of rock mass sliding wedge, depending on varying parameters and dimensions of the future dam Kambarata-1.