

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Бишкек 2012

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Начиная с 50-х годов, 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 оборудование экономичность возведения плотин указанными методами стала резко снижаться.

Ученные и проектировщики начали изыскивать новые методы, к которым можно отнести взрывной метод возведения плотин.

Впервые практическое использование энергии взрыва для строительства плотин произошло в 50-х годах прошлого века в Институте Киргизгипроводхоз и спецуправление Киргизвзрывпром. Взрывом были созданы две не большие фильтрующие опытные плотины на реках Аламедин и Шамси, а также были построены селезащитная плотина в Медео (Казахстан), водонапорная плотина в Байпазе (Таджикистан).

Анализ опыта эксплуатации этих плотин показало их большие преимущества по сравнению с бетонными и насыпными. Затраты на строительство и сроки возведения резко снижаются. Предварительные расчеты показывают, что плотина, созданная взрывообвальным способом с обрушением, в 1,5-2 раза дешевле, чем взрыво-набросная и может быть возведена 1,5 раза быстрее. Особенно ценным является такой метод строительство плотин в настоящее время, когда республика из-за нехватки средств не в состоянии самостоятельно приобрести современное оборудование и технику для бетонных и насыпных плотин.

Было получено тело плотины, устойчивое к напорам воды, а также как сейсмическом, так и в фильтрационном отношении. Однако надо отметить, что при этом вся работа по отрыву, дроблению, перемещению и упаковке

горных пород в тело плотины осуществляется с помощью энергии направленного взрыва, что приводит к большому удельному расходу ВВ.

В ИФиМГП НАН КР была выдвинута идея по использованию механизма образования естественных завальных плотин как природных аналогов при проектировании и строительстве каскада плотин Камбаратинских ГЭС. С этой целью был обследован целый ряд природных завальных образований в горных районах.

В работе дан анализ и обобщение существующих методов и способов возведения плотин на горных реках по литературным источникам. Более подробно описан взрывобросной метод возведения плотин, их преимущества и недостатки по сравнению с традиционными методами (насыпными и бетонными). В связи с проектированием и строительством в будущем плотины Камбаратинской ГЭС №1 на Карабашском створе, большой акцент сделан на изучение и установление особенностей возведения взрывобвальных плотин применительно к створу Камбаратинской ГЭС №1.

Для практического использования идеи природных аналогов при строительстве плотин Камбаратинской ГЭС №1 был выполнен опытный взрыв на речке Уч-Терек. Уч-Терекская взрывобвальная плотина оказалось дешевле 2 раза и возведена 1,5 раза быстрее по сравнению с Бурлыкской взрывобросной плотинной. Тем самым было доказано целесообразность возведения плотины Камбаратинской ГЭС №1 взрывобвальным способом, тем более с увеличением масштаба явления эффективность данного метода еще больше возрастает.

В результате этих обследований было установлено, что по возможности упростить задачи взрыва. При этом главная задача взрыва заключается в том, чтобы вывести горный массив на склоне из состояний равновесия. Вся остальная работа по дроблению, перемещению и упаковке горной массы в тело плотины можно возложить на освобожденной потенциальной энергией силу тяжести горных пород склона в процессе лавинообразного течения

грунта. Такой способ возведения плотин назван взрывообвальным.

По характеру движения обрушаемой грунтовой массы близки к движению некоторых типов селей и лавин, и аналогичны течению жидкости в открытых каналах. Описание течения однородной жидкости в открытых наклонных руслах является одной из основных проблем гидравлики. Это нелинейный длинноволновой процесс, описываемый гиперболическими дифференциальными уравнениями. Как правило, длинноволновое приближение позволяет уменьшить размерность рассматриваемой задачи, а гиперболичность системы отражает основные свойства процессов передачи возмущений в потоке жидкости и конечность скорости их распространения. Поэтому 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) [1,2,4-9]. Большое значение в создании математических методов анализа эволюции нелинейных длинных волн имела аналогия между уравнениями мелкой воды и уравнениями газовой динамики. Отметим, что данная аналогия также позволила для решения уравнений теории мелкой воды применить численные методики первоначально созданные для решения уравнений газовой динамики (схемы Лакса-Фридрихса, Мак-Кормака, Куранта-Изаксона-Риса, Роу, Ошера-Соломона, метод Годунова и др.) [2, 33, 43,44,45,101].

В настоящей работе рассматривается плоскопараллельное течение жидкости, позволяющее ограничиться изучением одномерной нестационарной задачи. Для моделирования движения грунтового-потока в качестве исходной взята модель уравнений однослойной мелкой воды, учитывающей 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. Очевидно, что общий метод исследования такого класса задач может быть

только численным. При выборе численного метода были учтены следующие обстоятельства:

- В большинстве работ по численному моделированию рассматриваемых явлений применяются различные схемы конечно-разностных методов (схема Лакса-Вендроффа, схема Мак-Кормака) [43,44,45,101] основное внимание уделяется описанию инженерно-геологических следствий расчетов и отсутствует детальное тестирование самих вычислительных схем. Из работ такого рода трудно судить о точности получаемых численных результатов и границах их применимости.

- 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), которые применяются при численном моделировании процессов газовой динамики и гидродинамики [2,12-26]. Существуют также примеры применения метода частиц (наряду с конечно-разностными методами) в теории мелкой воды и при моделировании движения оползней-потоков [3, 6-11].

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. Уникальные размеры плотины и зарядов для возведения плотины не встречающейся в мировой практике предъявляют особые требования к определению параметров обрушаемой массы с учетом рельефа местности, строение и физико-механических характеристик массива, а также выбор место заложения взрывчатого вещества и при проектировании и их размещении на склоне. Предлагаемый метод строительства плотины является совершенно новым, и в Кыргызстане еще не было построено ни одной плотины взрывообвальным способом, в связи с этим возникает необходимость выбирать оптимальные форму обрушаемой массы моделированием ее движение.

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. С использованием разработанного программного обеспечения автором проведены численные моделирование и анализ результатов задачи, и выбор оптимальных параметров обрушаемой массы при строительстве плотины взрывообвальным способом.

Апробация работы. Основные результаты диссертации по мере их получения докладывались и обсуждались 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.), научных семинарах кафедры «Механика» Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова (2008-2012 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в ___ печатных работах. Из них ___ 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, компьютерными графиками (их общее количество 39).

Работа состоит из трех глав.

Первая глава содержит обоснование использование энергии взрыва для строительства плотин. Исходя из изложенного выбор створа плотин с учетом выше перечисленных факторов резко увеличивает эффективность применения данного метода. Показано, что плотина, созданная взрывообвальным способом с обрушением, в 1,5-2 раза дешевле, чем взрывонабросная и может быть возведена 1,5 раза быстрее. Особенно ценным

является такой метод строительство плотин в настоящее время, когда республика из-за нехватки средств не в состоянии самостоятельно приобрести современное оборудование и технику для бетонных и насыпных плотин.

Во второй главе дается физическая и математическая постановка задачи о движении грунтового потока и описания метода частиц. Приведены результаты расчетов движения жидкости и грунтовых потоков по склону с постоянным и переменным углом наклона методом частиц. Приводится обзор математических моделей для описания близких по характеру движения грунтовых потоков, селей и снежных лавин.

Третья глава посвящена к выбору параметров взрывообвальной плотины с привязкой к Камбаратинской ГЭС №1 на Карабашском створе с учетом природных и масштабных факторов обеспечивающих безопасность и эффективности нового метода.

Следует пояснить систему ссылок. В каждой главе применяется независимая нумерация параграфов. Формулы в тексте параграфа нумеруются двумя номерами: первый из которых – номер главы, а второй – номер формулы. Ссылка на формулу данной главы содержит два номера, если же возникает необходимость сослаться на формулы из другой главы, то приводятся два номера, первый из которых соответствует номеру главы. Нумерация рисунков и таблиц в тексте параграфа нумеруются двумя номерами: первый из которых – номер главы, а второй – номер рисунка или таблицы.

ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПЛОТИН

1.1. Способы возведения плотин

Впервые практическое использование энергии взрыва для строительства плотин произошло в 50-х годах прошлого века в Институте Киргизгипрорводхоз (директор Молтоев Ж.М.) и спецуправление Киргизвзрывпром (начальник Иттер И.Я.). Взрывом были созданы две не большие фильтрирующие опытные плотины на реках Аламедин и Шамси.

Опыт их эксплуатации показал обязательную необходимость иметь при таких плотинах водоотводящие элементы. Из-за отсутствия таковых, обе плотины были смыты при больших паводках.

Начиная с 50-х годов, 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 (Ат-Башинская, Токтогульская, Курпсайская, Ташкумырская, Андижанская, Шамалды-Сайская) и насыпные плотины из местных материалов (Уч-Курганская, Нурекская, Рогунская и др.). Однако, за последние годы с ростом стоимости материалов и оборудование экономичность возведения плотин указанными методами стала резко снижаться.

Ученные и проектировщики начали изыскивать новые методы, к которым можно отнести взрывной метод возведения плотин. С помощью взрыва были построены селезащитная плотина в Медео (Казахстан), водонапорная плотина в Байпазе (Таджикистан), опытные плотины Бурликия и Уч-Терек по моделированию условий Камбаратинских плотин №2 и №1.

Анализ опыта эксплуатации этих плотин показало их большие преимущества по сравнению с бетонными и насыпными. Затраты на строительство и сроки возведения резко снижаются. Было получено тело

плотины, устойчивое к напорам воды, а также как сейсмическом, так и в фильтрационном отношении. Однако надо отметить, что при этом вся работа по отрыву, дроблению, перемещению и упаковке горных пород в тело плотины осуществляется с помощью энергии направленного взрыва, что приводит к большому удельному расходу ВВ.

Правительством республики было принято решение приступить к строительству плотины Камбаратинской ГЭС №2 (на Уч-Тереском створе) собственными силами. При этом, учитывая, что республика не располагает достаточно сильным коллективом проектировщиков, к этой работе было решено подключить Россию и Узбекистан. Положительные отклики были получены только со стороны России. В настоящее время ведутся переговоры по проектированию о строительстве и в будущем, о дальнейшей совместной эксплуатации Камбаратинских ГЭС №1. По первоначальному проекту Советского периода обе плотины предусматривались возводить с использованием энергии взрыва, так как при этом резко снижается стоимость строительства и сокращается сроки их возведения по сравнению с традиционными методами. Российское руководство РАО ЕЭС и проектировщики также придерживаются такого же мнения. В бюджете РФ на 2005 год были заложены средства в сумме 100 млн. рублей для предварительного определения стоимости Камбаратинской ГЭС №1.

В ИФиМГП НАН КР была выдвинута идея по использованию механизма образования естественных завальных плотин как природных аналогов при проектировании и строительстве каскада плотин Камбаратинских ГЭС. С этой целью был обследован целый ряд природных завальных образований в горных районах.

В результате этих обследований было установлено, что по возможности упростить задачи взрыва. При этом главная задача взрыва по нашему мнению заключается в том, чтобы вывести горный массив на склоне из состояний равновесия. Вся остальная работа по дроблению, перемещению и упаковке горной массы в тело плотины можно возложить на освобожденной

потенциальной энергией силу тяжести горных пород склона. Такой способ возведения плотин нами назван взрывообвальным. Взрывом создается только искусственный обвал.

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

В отчете дан анализ и обобщение существующих методов и способов возведения плотин на горных реках по литературным источникам. Более подробно описан взрывонабросной метод возведения плотин, их преимущества и недостатки по сравнению с традиционными методами (насыпными и бетонными). В связи с проектированием и строительством в будущем плотины Камбаратинской ГЭС №1 на Карабашском створе, большой акцент в отчете сделан на изучение и установление особенностей возведения взрывообвальных плотин применительно к створу Камбаратинской ГЭС №1.

Рассмотрена взаимосвязь природных факторов таких как тектоника, блочность, крутизна и высота склона и масштабы явления на механизм образования завалов. Для практического использования идеи природных аналогов при строительстве плотин Камбаратинской ГЭС №1 был выполнен опытный взрыв на речке Уч-Терек. Уч-Терекская взрывообвальная плотина оказалось дешевле 2 раза и возведена 1,5 раза быстрее по сравнению с Бурлыкской взрывонабросной плотинной. Тем самым было доказано целесообразность возведения плотины Камбаратинской ГЭС №1 взрывообвальным способом, тем более с увеличением масштаба явления эффективность данного метода еще больше возрастает.

Существующие типы и способы возведения плотин можно классифицировать как по материалу, с помощью которого она строится, так и по назначению и по конструкции (см. рис. 1.1).



Рис. 1.1. Типы и конструкции плотин

По материалам плотины состоят в основном из местных материалов.

По назначению все существующие плотины делятся на водонапорные, селезащитные и фильтрующиеся.

Существует различные варианты каменно-набросных плотин с механической отсыпкой, отличающиеся друг от друга в основном конструкцией ядра, экрана и других противофильтрационных узлов.

В свою очередь взрывонабросные плотины могут быть водонапорные (Байпаза, Бурлыкя), селезащитные (Медео), фильтрующиеся (Аламедин, Шамси, Ак-Суу) и комбинированные (Папан).

Комбинированным считается такой способ, когда основная упорная призма возводится взрывом, а противофильтрационные мероприятия выполняется обычным способом. Именно у комбинированного метода большое будущее.

Бетонные плотины бывают арочные, гравитационные (Токтогульская, Курпсайская, Наглу) и контрфорсные (Андижанская, Кировская).

Выбор типа плотин зависит от множества факторов, но главнейшими являются: тектоника района, сейсмичность, горно-геологические и топографические условия створа, а также наличие поблизости запасов необходимых материалов для насыпи, дорог, освоенность района, наличие электроэнергии, квалифицированных кадров, различных коммуникаций и др. В настоящее время наблюдается повсеместный переход к строительству высоких плотин, как из местных материалов, так и бетонных. Например, высота насыпной плотины Нурекской ГЭС составляет 310м, а Рогунской ГЭС-350м. Высота Токтогульской бетонной плотины равна 215м. Выбор типа плотин и способов его возведения является ответственной задачей и к нему надо подходить очень строго и внимательно. В каждом конкретном случае необходимо учесть все факторы "за" и "против" данного типа плотин. Окончательный выбор типа плотин производится путем технико-экономического обоснования различных вариантов. При этом необязательно ограничиться сравнением нескольких типов плотин для одного створа, а

существует острая необходимость сравнения нескольких створов с различными типами плотин, расположенных поблизости. Только после этого можно выбрать оптимальный тип плотины применительно к данному створу. Во многих случаях удачный выбор оптимального типа плотины соответствующего условиям створа определяет половины успеха всего проекта в целом.

Наибольшее распространение на практике получили плотины из местных материалов. Это так называемые каменно-земляные плотины, выполненные из наброски камня в сочетании с гравелисто-галечнивыми грунтами. Эти плотины возводятся как с противофильтрационными экранами, так и с ядрами. Положительной чертой таких плотин является возможность их поэтапного возведения и последующего наращивания.

Для возведения каменно-земляных плотин необходимо иметь поблизости от створа плотины:

- а) карьеры по добыче камня;
- б) карьеры по добыче гравелисто-галечникового грунта;
- в) карьеры по добыче глины.

Если какой - нибудь из этих карьеров окажется расположенным далеко от места заложения створа, то это приводит к резкому росту стоимости строительства.

Второй существенной особенностью возведения таких плотин является перевозка всего необходимого грунта к створу плотин автотранспортом и их упаковке по определенной последовательности в тело плотины. Для обеспечения плотности укладки применяются мощные пневмо- и вибро-катки. Высокие требования предъявляются к гранулометрическому составу камня и гравелисто-галечникового грунта.

В целом при возведении плотин из местных материалов с помощью механической отсыпки коэффициент насыщения машинами и механизмами высокий.

Однако, несмотря на полную механизацию трудоемких процессов стоимость строительства плотин по данному методу довольно высокая. Средняя стоимость 1м грунта, уложенного в тело плотины, составляет 40 рублей (по цене 1970 г)

Высокие требования к створу предъявляются при возведении бетонных плотин. Узкие и высокие прочные борта являются основными условиями для возведения бетонных плотин. Не менее важными условиями являются правильная оценка прочности и устойчивости сооружения совместно с основанием. Особенно важно это условие в сейсмоактивных районах. В большинстве случаев бетонные плотины достаются ценой неэкономичных решений. В связи с этим наблюдались увлечение с облегченными арочными типами бетонных плотин.

Однако, аварии плотин Мальпасе и ряда других плотин заставила проектировщиков переходить к гравитационным и контрфорсным типам бетонных плотин (плотины Наглу, Токтогульской, Курпсайской ГЭС и плотин Андижанского и Кировского водохранилищ).

Однако, отдаленность высокогорных районов, трудность доставки материалов и оборудования приводит к высокой стоимости строительства бетонных плотин.

По сравнению с бетонной плотинной взрывной метод возведения плотин в 1,5-2 раза обходится дешевле. Ниже описан опыт возведения плотин с использованием энергии взрыва.

1. 2. Сооружение плотин методом направленных взрывов.

Строительство плотин в высокогорных условиях имеет ряд особенностей, определяющих стоимость и сроки строительства. Горные районы, являющиеся перспективными для плотиностроения с крупными ГЭС, характерны труднодоступностью, малонаселенностью, отсутствием дорог и инженерных коммуникаций. Кроме больших капитальных вложений, их

сооружения требует десятки тысяч тонн дефицитных материалов, доставка которых ввиду отсутствия хороших путей сообщения весьма затруднительна. Потребность в большом количестве высококвалифицированной рабочей силы и обеспечение их жильем, узость фронта работ, необходимость строительства дорог (тоннелей) и подземных путей на разных отметках склонов, в особенности при большой их крутизне, проходка водопропускных тоннелей и т.д. являются неблагоприятными факторами для обычных методов возведения плотин.

В этих условиях способ строительства плотин с помощью энергии взрывов позволяет в значительной мере позволить преодолеть указанные трудности, существенно сократить сроки и стоимость строительства, а также упростить схему производства работ.

Примерами практического осуществления таких проектов является плотина Байпазинского гидроузла на р. Вахш, селезащитная плотина на р. Малая Алматинка, фильтрующие плотины Шамси, Аламедин и Аксуу, водонапорная плотина на р. Бурлыкя и др. Пробразом этого способа возведения явились десятки естественных завальных плотин, образовавшихся в горных районах при землетрясениях.

Как было указано выше, родоначальниками применения взрыва для возведения плотин является Кыргызская Республика. В пятидесятых годах 20 века в республике по инициативе управления "Киргизгипроводхоза" и "Киргизвзрывпрома" были созданы две небольшие плотины на реках Шамси и Аламедин. Обе плотины проектировались как фильтрующие для осветления воды и очистки от твердого стока этих горных рек. Высота Шамсинской плотины была 26м, а Аламединской 21м. Обе плотины просуществовали не долго. Размыв произошел при превышении расхода реки 10-12 м³/с. В результате прохождения расхода 18 м³/с воды, она пошла через верх и благодаря чему заложение нижнего откоса увеличилось до 1:41.

Такое положение создалось вследствие того, что предполагаемая проектировщиками идея о возможности пропуска всего расхода воды через

тело плотины в виде фильтрации осуществить не удалось, так как для этого степень дробления взорванной горной массы должна была иметь очень крупные размеры или же объем водохранилищ должна быть достаточно большим. Эти условия не были соблюдены, что послужило причиной размыва этих плотин.

Спустя 10 лет эти же явления повторились, но уже в более крупном масштабе на естественной завальной плотине на озере Иссык близ г. Алматы. Уроки Иссыка были в центре внимания широкого круга специалистов и общественности страны, тогда как уроки Шамсинской и Аламединской плотины остались никому не известными.

Уроки Шамси, Аламедина и Иссыка заключается в том, что любое сооружение типа плотин должно иметь водобросные сооружения (в виде тоннеля или водоводов). Эти уроки в настоящее время хорошо усвоены и при проектировании последующих взрывных плотин неукоснительно выполняются (Медео, Байпаза, Бурликция и др.)

За последние 20 лет взрывом был создан ряд уникальных сооружений различного назначения. Взрывной метод строительства обеспечил значительную экономию времени, трудовых и материальных ресурсов. Строительство селезащитной плотины "Медео". Город Алма-Ата, расположенный на селевых выносах р. Малой Алматинки, находился под постоянной угрозой разрушения селевыми потоками. Радикальным способом защиты было признано сооружение селеулавливателя плотинного типа. Ввиду возможного возникновения сели в период строительства плотину необходимо было создать в течении межселевого периода (с октября по май месяц следующего года, т.е. за 7-8 месяцев).

Таким образом, ограниченные сроки возведения были одним из характерных особенностей этого сооружения. В противном случае недостроенная плотина могла бы усугубить разрушительное действие возможного селевого потока, добавив в него свою массу породы. С помощью обычных методов создания плотины высотой около 100м и объемом более 2,6

млн. м³ в течении указанного срока практически невозможно. Единственно приемлемым вариантом возведения плотины было признано применение направленных взрывов [95,96,97].

Проектом предусматривалось проведение двустороннего взрыва.

Основной объем породы в тело плотины предполагалось уложить в результате взрыва правого склона, а доработке плотины до проектных отметок - за счет взрыва левого склона. Для обеспечения большей направленности действия взрыва расположение зарядов было принято двухрядным. Основные параметры зарядов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Основные технико-экономические показатели взрывонабросных плотин

Показатели	Медео		Байпаза		Ак-Суу		Бурлыкья	
	проект	фактич	проект	фактич	проект	фактич	проект	фактич
Общая масса зарядов, т	9209	9235	1819	1904	600	577	702	702
Объем проходческих работ, м ³	17501	16094	5927	6403	2000	2216	2661	2661
Объем взорванной породы (в плотин. теле) тыс. м ³	4070	4350	802,9	1094	547	590	443,4	662
Объем породы, уложенной в проектный контур плотины, тыс. м ³	2840	2520	728	778	-	360	188	338
Удельный расход ВВ, кг/ на сброшенную породу	3,25	3,66	3,04,	2,44	2,44	2,29	3,37	2,08
Стоимость 1м ³ сброшенной в плотину породы, руб	1,92	2,14	1,90	1,60	1,62	1,29	-	1,18

В створе плотины долина реки сужается, образуя ущелья глубиной до 700м и шириной понизу 50м, со средней крутизной склонов 40-45°. Борты ущелья сложены изверженными породами, крупнозернистыми гранитами.

В качестве ВВ были применены тротил -4113т, аммонит №6 и №9 426т, рногранулит-528т, аммонит 6ЖВ-230т.

В результате правобережного взрыва образовалось плотина высотой 60м, шириной по основанию 56м и общим объемом в тело плотины 1,5 млн.м³.

Распределение породы после взрыва получилось несколько неожиданным. Наибольшее количество породы было переброшены к левому берегу, в то время как по проекту предполагалось, что основной объем останется у правого берега.

Левобережный взрыв также приводился в два этапа. Фактическая последовательность в нем отличается от проектной. Все пять зарядов первого ряда взрывались одновременно, хотя по проекту заряды №1 и №5 должны были взрываться замедлением. Кроме того, три заряда второго ряда (№6,7 и 8) также взрывались одновременно с зарядами первого ряда. По проекту же предполагалось, что все пять зарядов второго ряда будут взорваны через 2с. Проектный интервал замедления оказался выдержанным только для зарядов №9 и 10. В результате указанных отклонений общая масса зарядов первого взрыва составила 2746т, а второго 1195т. Объем навала от левобережного взрыва составил 1,0 млн.м³. За счет этого взрыва высота плотины увеличилась от 10 до 30м. На ее гребне в районе минимальной отметки увеличение составило 15м.

Окончательная высота плотины в самой низкой части равна 75м, средняя по сечению вдоль оси 84м. Общий объем породы в теле плотины после двух взрывов равен примерно 2,6 млн.м³, ширина по основанию -500м, по гребню - около 100м.

Наиболее существенное отклонение от ожидаемых величин наблюдается для высоты плотины: фактическое значение ее оказалось примерно на 20м меньше проектной. Недобор высоты плотины объясняется разными авторами по-разному, но нигде не указана возможность сползания пород вниз по уклону. Уклон долины был 5-7°. Этот фактор нами был

обнаружен при изучении естественных завальных плотин. Кроме этого здесь при расчете зарядов плохо учтено малая высота и крутизна.

Другой причиной недобора высоты является малая величина коэффициента разрыхления. Коэффициент разрыхления гранитов при взрыве принят равным 1,2, вместо ожидаемого 1,5. Объемный вес тела завала в среднем составил 2,1 т/м³.

Как известно, качество и фильтрационные свойства тела плотин определяются плотностью и гранулометрическим составом взорванных горных пород.

Для оценки геотехнических свойств тело плотин после взрыва были пройдены три шурфа глубиной 13, 17 и 20 м.

Средняя пористость тело плотины мала, она характеризуется 20%.

Средний коэффициент разнородности материала тела плотины составила

$$\eta = d_{60}/d_{10} = 60$$

Следует отметить значительную неравномерность распределение материала по платине. Геофизические методы исследования установили наличие значительных пустот в теле плотины, образованных, видимо, скоплением крупных отдельностей. Плотность тела плотин также неравномерный. Верхняя часть завала (до глубины 2,5м) характеризуется относительно рыхлым сложением с отдельными зияющими пустотами. С глубиной плотность возрастает, но неравномерно. Таким образом, следует ожидать сосредоточенной фильтрации в отдельных зонах плотины, как это наблюдалось в ряде естественных завальных плотин.

Исследованиями [98] показано, что плотность материала взрыво-набросных плотин (Медео, Байпаза) при аналогичном гранулометрическом составе более высокая, чем насыпных (Чарвакская). В то же время небольшие опытные плотины, возведенные взрывом (Курпсайская) уплотнены недостаточно. Таким образом, с точки зрения плотности упаковки взрывной

способ наиболее эффективен при сооружении высоких и сверхвысоких плотин с большой массой.

Опыт "Медео" показал, что примерно с глубины 20м плотность тела плотины стабилизируется, следовательно, плотины малой высоты, возводимые взрывом, непрочны. Доказательством могут служить плотины Шамси и Аламедин.

Основные проектные и фактически достигнутые технико-экономические показатели взрыва в Медео приведены в таблице 1.1.

Удельный расход на 1м породы, сброшенной в тело плотины, составил 3,66кг, а стоимость 1м горной породы, уложенной в тело плотины равно 2 руб. 14 коп., тогда как при механической отсыпке - 4 руб. Плотина возведена за 9 месяцев, вместо 30 месяцев при обычных способах.

Проверкой надежности плотины в Медео было осуществлена после катастрофической сели, которая прошла в 1973 году и плотина выдержала его напор. Плотина в Медео, созданная взрывом явилось крупнейшей вехой в истории развития взрывного дела не только в СССР, но и во всем мире.

Впервые в мировой практике за столь короткий промежуток времени (9 месяцев) было создана плотина высотой 85м, объемом 2,6 млн.м³. Несмотря на некоторые отклонения от проекта, созданная плотина решила основную задачу - защиту города Алма-Ата от селевых потоков. Большое значение имеет опыт Медео для проектирования и проведения будущих крупных взрывов, в особенности в вопросах организации и проведения взрывов и в обеспечении безопасности работ. Необходимо подчеркнуть, что такой крупный взрыв проведен вблизи большого современного города. Еще большее значение приобретают научные результаты. Это такие вопросы, как расчет зарядов, кинематика движения взорванной горной массы и ее распределение, выход продуктов взрыва и их роль в развитии взрыва и т.д. Все эти вопросы для такого крупномасштабного взрыва были изучены впервые.

Однако нельзя утверждать, что взрывом в Медео решены все проблемы крупномасштабного взрыва на склонах. Наоборот, взрыв в Медео, открыв новую эру в истории применения энергии взрыва в интересах народного хозяйства, поставила перед взрывной наукой новые проблемы и задачи. К ним относятся; расчет зарядов на склонах, роль продуктов взрыва, распределение взорванной массы, установление связи между кинематическими и начальными параметрами взрыва обеспечение последовательность взрывания отдельных зарядов, оценка геотехнических свойств плотин, роль тектонических нарушений и др.

Несомненные результаты взрыва в Медео является громадным преимуществом этого метода перед традиционными методами как в части экономии времени и трудовых ресурсов, так и в надежности создаваемого сооружения.

1.3. Бурлыкский опытный взрыв.

В настоящее время идет обсуждения ТЭО проекта Камбаратинской ГЭС№1 на р. Нарын, плотину которой намечено было возводить взрывным способом. Этот проект в те времена отличались от описанных выше масштабom своих работ. Намеченные объемы тела плотин 160 млн. м³, высота 300м длина вдоль русла реки 2600м. Масса зарядов 500тыс.т. Глубина заложения зарядов до 260м.

Эти уникальные размеры плотины и зарядов для его возведения не встречающейся в мировой практике предъявляют особые требования к расчету зарядов при проектировании и их размещении на склоне этого взрыва.

В связи с этим возникла идея провести опытный взрыв, моделирующий будущий Камбаратинский в линейном масштабе 1:7. Для этого на р. Бурлыкя был выбран створ по топографическим и инженерно-геологическим условиям подобный условиям на Камбаратинском створе.

Правый борт каньона имеет угол наклона в пределах 50-70° , левый борт от 45-50° в верхнем бьефе до 80-90° в нижнем. Породы представлены грубокрупнозернистым порфировидным гранитами. В обнажении граниты сильно выветрены и трещиноваты. Группа крепости пород по шкале СН и П.

Проектом производства взрыва намечалось сбросить в каньон 478 тыс.м³ породы и образовать навал высотой 40м, длиной 260м и объемом 188 тыс.м³. Расчетный коэффициент разрыхления был принят 1,26.

Учитывая заданные параметры плотины и рельеф местности, в проекте принято двухрядное расположение зарядов на левом берегу и однорядное -на правом берегу. Конструкция заряда была принята линейной, что обеспечило уменьшение объема подходных выработок и дало возможность рассредоточения зарядов по массиву, большую проходку подготовительных выработок и повышение точности укладки горной массы в плотину. В качестве ВВ был принят граммонит 79/21. Линия наименьшего сопротивления (л.н.с.) для основных зарядов была принята в соответствии с проектом для левого берега 7-40м, для правого 9-24м. Л.н.с. вспомогательных зарядов определялась рельефом местности и необходимостью подработки склонов для направленного действия основных зарядов. Эти л.н.с. изменялись в пределах 8-22м.

Предусматривалось короткозамедленное взрывание. В результате взрыва образована плотина со следующими параметрами:

Высота по тальвегу (максимальная), м	- 51
Длина по гребню, м	-140
Ширина по руслу, м	- 346
Откос верховой	- 1:2,8
Откос низовой	-1:2,1
Объем плотины, тыс. м ³	- 338

Гранулометрический состав взорванной горной массы определен по результатам ситового анализа, выполненного Институтом Средазгидро-проекта при проходке шурфов в теле плотины. Гранулометрический состав

массива определяли планиметрическим способом по стенкам подходных и зарядных выработок. В результате взрыва произошло интенсивное дробление горной массы. Около 50% навала имеет размер фракции $d=100\text{мм}$. Содержание мелкозема (фракции - 5мм) составило 13-20%. При этом с глубиной содержание мелких фракций увеличилось. Что способствовало лучшему заполнению пор и повышению плотности навала. Плотность навала также увеличивается с глубиной (от $1,8 \text{ т/м}^3$ на поверхности до $2,1 \text{ т/м}^3$ на глубине). Тело плотины, как по плотности, так и по грансоставу обеспечивает заданные коэффициенты фильтрации.

Характерной особенностью выполненного взрыва является превышение фактического объема тела плотин в 1,8 раза по сравнению с проектной. Такое положение сложилось благодаря дополнительному объему, который получен в процессе обрушения левого высокого борта склона. По оценке ИФЗ [98] объем обрушения со склона составил 35% от общего объема. Объем обрушении растет с ростом высоты склона и масштабы взрыва.

Другой особенностью данного взрыва была оценка его влияния на близлежащие сооружения и выработки. Еще раз доказано, что сейсмическое влияние на подземные выработки и сооружения не носит катастрофический характер. Разрушение произошло вследствие раскрытия естественных трещин и связано с природной трещиноватностью массива.

В целом Бурлыкский опытный взрыв показал экономическую целесообразность возведения плотины Камбаратинской ГЭС №1 и №2 взрывом способом. Прогнозные оценки показывают, что при Камбаратинском взрыве по сравнению с Бурлыкской увеличивается объем обрушения пород за счет действия силы тяжести и масштаба явления. Это может привести к резкому снижению стоимости плотины. Плотность упаковки тела плотины также резко возрастает.

Еще одной особенностью этого взрыва является применение удлиненных зарядов выброса по сравнению с камерными. Известно, что при подготовке массовых взрывов по созданию каменно-набросных плотин сроки

его возведение в основном определяются временем проходки подготовительных и зарядных выработок. По этому показателю удлиненные линейные заряды имеют большие преимущества перед камерными зарядами, поскольку подготовительные выработки служат одновременно и зарядными [100].

1.4. Основные предпосылки для образования естественных завальных плотин в горных реках Средней Азии.

В ряде горных рек Средней 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 и 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. м³. Параметры Сарезкого завала еще больше: высота 800м, объем завала 2,2 млрд.м³.

В связи с этим нами изучен ряд естественных завальных плотин с целью выявления основных предпосылок, приведших к их образованию. Путем организации экспедиционных работ рассмотрен и изучен механизм образования естественных завальных плотин Кара-Суу, Капка-Таш, Кара-Токо, Сары-Челек и ряда других.

В результате этого выявлено следующее: естественные завалы в природе встречаются гораздо больше, чем нам известно. Многие завалы со временем смывается водой и поэтому не образуется завальное озеро.

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

Для образования завала или обвала необходимо сочетание ряда естественных и искусственных факторов. Этими факторами являются тектоническая подготовленность массива к обрушению данного участка, врезке и раскрытие рекой ослабленных зон и тектонических нарушений, трещин и наличие внешнего импульса в виде сейсмического толчка, расположенного поблизости.

Когда мы говорим о тектонической подготовленности массива, то имеется в виду наличие на склоне зоны ослабления, дробленных зон, крупных трещин.

К механизму естественного завала речке Кара-Суу.

Этот завал находится в верхнем течении одноименной р. Кара-Суу, впадающей в р. Нарын у поселка Кара-Куль. Все завалы, в том числе и Кара-Суу расположены в зоне Таласа-Ферганского крупнейшего разлома. Левый берег этой долины сложен массивными серыми известняками с прослоями сланцев. На правом берегу залегают кристаллические слюдистые сланцы с мелкими секущими грезеновидными телами и жилами кварца. Породы простираются вдоль Таласо-Ферганского разлома и круто падают на СВ.

Обвал произошел в отдельное время, т.к. на поверхности навала растут крупные арчи с толщиной стволов более полуметра, что указывает на возраст в многие сотни лет.

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.

Районы рассматриваемых завалов характеризуется отсутствием мощного рыхлого покрова и наличием сосредоточенных напряжений. Приуроченность поверхностей отрыва обвальных масс к эпицентральному

морфоструктурам или их элементам указывает на непосредственную связь обвалов с землетрясением. Именно в эпицентральных частях поверхности над очагом землетрясения должно выделяться максимальное количество энергии в виде толчков, которые в случаях обвалов играют роль их начальных импульсов. Неустойчивая масса обвала, будучи сорвана с места первоначальным энергичным толчком при землетрясении неудержимо устремляется вниз, к тальвегу долины, где, взаимодействуя с ее бортами, образует навал. Такие навалы часто служат плотинами озер. Это отмечалось в Кара-Суу, Капка-Таш, а также Сары-Челеке и Кара-Токо.

Истинная причина обрушения данного участка склона можно характеризовать тремя основными факторами: наличием в данном склоне плоскости скольжения, близость данного участка эпицентральной морфоструктурам сосредоточенных напряжений и близость к эпицентрам землетрясений. Путем реконструкции склона удалось обнаружить, что в качестве плоскости скольжения послужил залегающий там тальк, мощностью приблизительно 3м. Это слабая, мелкая горная порода малой прочности. В далекие от нас времена это плоскость была закрыта. Затем, со временем речка разрушила ущелье и углублялось. По истечению времени, эта плоскость как бы открылась и предполагаемая масса как бы было готова к обрушению не хватало только начального импульса. Этим импульсом послужило землетрясение, прошедшее в давние времена. Путем реконструкции склона удалось приблизительно определить центр тяжести обвалившейся породы до обрушения и путь перемещения этого центра. Расстояние между центрами тяжести по вертикали равно 760м, а по плоскости скольжения 1800м. Знание указанных параметров позволяет приблизительно оценить потенциальную энергию обрушившихся горных масс склона по формуле

$$E_{\text{пот}} = \gamma g V H, \text{ Дж}$$

где γ - плотность пород, g - ускорение силы тяжести, V - объем обрушившихся горных масс, H - расстояние между центрами тяжести висячих горных масс и навала.

Определены приближенные объемы горных пород в целике (128,7 млн.м³) и в навале (142,5 млн.м³). Тогда коэффициент разрыхления в навале будет 1,1.

Тенденция уменьшения коэффициента разрыхления с увеличением объема горных масс, которые были отмечены при взрыве в Медео, подтверждается и на примере Кара-Суйского завала.

Наиболее интересной является задача установления распределения горной массы в каньоне реки как для плотины или завала, а также определения его параметров. Отличительной особенностью Кара-Суйского завала [99] является то, что основной объем горной массы лежит на противоположном борту долины реки. Высота завала возле этого борта наибольшая и составляет от 300 до 350м, тогда как у обрушенного борта составила наиболее низкой 120м. Это означает, что обрушенную породу как бы выплеснуло на противоположный борт. Этому способствовало идеальная плоскость скольжения обрушенной массы и их большая масса. Скорость движения обрушаемой породы прямо пропорционально ее массе и растет с расстоянием. В процессе перемещение обрушаемой массы соответственно происходит соударение кусков и их дробление. Дойдя до противоположенного борта обрушаемая масса затормаживается, теряет скорость и начинается его сползание по склону (45°) вдоль долины (5°). Поэтому высота плотины здесь 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). Верхняя бьефа круче, чем нижняя.

Вышеописанный 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 образной части каньона р. Уч-Терек, подобный условиям створа Камбаратинской ГЭС №1. Главная задача этого взрыва заключалась в создании с помощью зарядов ВВ

искусственного обрушение верхней части от заряда склона, которая затем в процессе перемещения с помощью потенциальной энергии силы тяжести данной горной массы формировал бы завальную плотину. Заряд состоял из двух частей (рис. 1.1): нижнего, рассчитанного на сброс и верхнего, рассчитанного на рыхления.

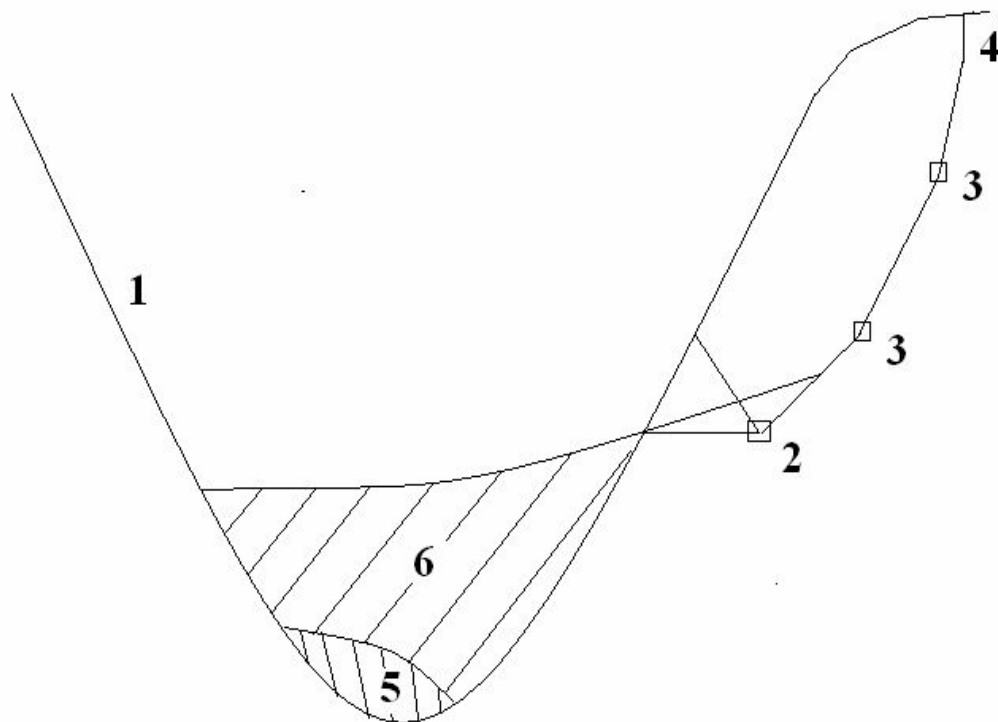


Рис. 1.1. Поперечный профиль Уч-Терекского опытного взрыва. 1 - склон до взрыва; 2 - заряд сброса; 3 - заряд рыхления; 4 – трещины отрыва; 5 - тело плотины от заряда сброса; 6 - тело плотины от заряда рыхления и обрушения за счет потенциальной энергии силы тяжести.

Линия наименьшего сопротивления нижнего заряда колебалась в зависимости от конфигурации склона от 43 до 55м (по разным сечениям), массы заряда была 1495т. Взрыв этого заряда обеспечивал разрушение и взброс нижней подпорной стенки предполагаемой призмы обрушения для верхнего заряда. Таким образом, взрыв этого заряда создавал условия для истечения и движения разрыхленного верхним зарядом горной массы. Нижний заряд при массе 1495т разрушил и вбросил всего 25 % от общего объема призмы обрушения. Верхний заряд с $W=92\text{м}$, $Q=803\text{т}$ 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 природе существует повсюду и реализуется в сейсмоопасных горных районах вблизи очагов землетрясений. В данном случае взрыв нижнего заряда, разрушив и сбросив подборку, создал условия для лавинообразного движения для верхнего объема горной массы взорванного только на рыхление.

При этом главную роль играли два фактора. Первый - отсутствие подборки и второй реализации потенциальной энергии силы тяжести обрушенных горных масс склона. Эта энергия тем больше, чем больше объем обрушаемой массы. Это было видно из примера Кара-Суйского завала. Именно эта же энергия силы тяжести горной массы в процессе лавинообразного движения по склону производит работу по дроблению (путем соударения и т.д.), перемещению и упаковке обрушенной горной массы в тело завала (плотины). Метод позволил сократить удельный расход ВВ. Он составил $0,9 \text{ кг/м}^3$ на весь объем сброса и обрушения. Чем больше масштабы обрушения, тем эффективнее данный метод.

Таким образом, на основе изучения естественных завальных образований (плотин), в частности на примере Кара-Суйского завала, а также Уч-Терекского опытного взрыва можно сформулировать физическую сущность взрывообвальной плотины.

Взрывообвальной называется плотина создаваемые на каньонах горных рек с помощью взрыва и обрушения. При этом объемы горных пород от взрыва значительно меньше, чем объемы обрушения с помощью энергии силы тяжести горных масс. Соотношения объемов от взрыва и от обрушения зависит от ряда факторов, таких как тектоническая подготовленности массива (наличие плоскость скольжения, тектонических трещин, ослабленных зон) и масштабы взрыва. Исходя из изложенного выбор створа плотин с учетом выше перечисленных факторов резко увеличивает эффективность

применения данного метода. Задачей дальнейших исследований является оптимизация параметров взрывообвальной плотины с привязкой к Камбаратинской ГЭС №1 на Карабашском створе с учетом природных и масштабных факторов обеспечивающих безопасность и эффективности нового метода.

1.6. Строительство дамбы -моста на реке Ак-Суу взрывным способом.

По техническому заданию необходимо было с помощью взрывов на сброс перекрыть каньон р. Ак-Суу для образования дамбы, по гребню которой будет проходить дорога, связывающая оба берега реки.

Особенностью этого взрыва было следующее:

- не регламентировался фракционный состав взорванной горной породы;
- из-за большой крутизны ущелья потребовались меры по предотвращению растеканию пород по уклону;
- необходимо было обеспечить направленность броска породы с целью концентрации навала по гребню плотины;
- обеспечение сейсмической защиты объектов, расположенных поблизости.

Взрываеваемый массив был представлен в основном тонко - и скрыто кристаллическими известняками. Известняки имели, плитчатую отдельность и относились V-VI категории по шкале СНиП. Взрывались оба борта перекрываемого каньона, которая в районе створа дамбы составил 75-85 , а в левом борту 60-80°.

Проектом было сопоставлена эффективность однорядного и двухрядного расположение зарядов. Было принято двухрядное расположение зарядов, обеспечивающее требование проекта.

Всего было взорвано 2 зарядов с общей массой ВВ 576т. Основной заряд имел $W=35M$, $Q=163T$. Интервал замедления между отдельными

зарядами колебался от 200 до 750мс. Всего было взорвано 561т зерногранулита 79/21 и 34т аммонита №6 ЖВ.

Взрыв был произведен в феврале 1973 г. В результате взрыва зарядов правого берега было полностью перекрыто русло реки и в пределы контура дамбы уложено 246,5 тыс. м³ породы. Ширина дамбы по руслу реки составила 330м, средняя высота 88м, с заложением верхового откоса 1:1,8 и низового 1:1,75. После взрыва левого берега в пределы проектного контура дамбы было уложено еще 5 тыс. м³ породы. Средняя высота дамбы достигла до 93м.

Таким образом, в тело дамбы было сброшено двумя взрывами 251 тыс. м породы. Общий объем породы взорванной двумя взрывами составил 590 тыс. м. Коэффициент взрыхления составил 1,26.

По данным наблюдений, выполненных Институтом ВОДГЭО расход воды после взрыва уменьшился от 0,18 до 0,07 м /с. Замеры, проведенные в марте 1973 г показали, что расход воды увеличился до 0,5м³/с. 8 мая 1973г уровень воды в озере достиг отметки 1315 м и вода пошла по тоннелю.

Максимальная дальность разлета отдельных кусков породы достигла 600-700м. Как показали замеры кусковатости по развалу взорванной породы, выход фракции размером ребра до 30м составил около 60%, а с максимальным размером ребра более 1м - всего около 1%. Для сравнение следует отметить, что при производстве Байпазинского взрыва выход фракций указанных классов составлял соответственно 23 и 7,5%. Важно отметить, что средний диаметр кусков после взрыва весьма точно соответствует диаметру естественной отдельности в массиве (соответственно 32 и 34 см). Наиболее крупные куски отбитой породы объемом 80м³ находятся в верховом откосе дамбы.

Выполненные взрывы показали, возможности направленного броска используя специальную схему и время замедления. Если бы расчет

производился по формулам Технических правил [9] (без учета разработанной в проекте схем взрывания), то высота дамбы составила бы всего 70-75м. За счет этого уменьшилось объем механизированной досыпки от 8 тыс. м до 2,5 тыс. м³.

Впервые применен заряд против "растекания" грунта, уложенного взрывом на русло реки, имеющий значительный уклон. Между тем при взрыве в Медео этот фактор не был учтен, что привело к значительному недобору высоты плотин за счет растекания грунта.

Впервые оказались безопасными для водопропускного тоннеля и сооружений, т.к. фактические скорости колебаний были на 40-50 % меньше предельных значений. К неблагоприятному последствию взрывов можно отнести обрушение неустойчивых массивов на левом берегу каньона, в результате чего площадка перед порталом водопропускного тоннеля оказалось засыпанной на расстоянии около 10м. Основные технико-экономические результаты взрыва приведены в табл. 1.

Применение этого взрыва обеспечило уменьшение стоимости работ на 100 тыс.руб. и сокращение сроков строительства на 6 месяцев по сравнению с проектом строительства моста через эту реку.

При механизированной отсыпке дамбы (с предварительным взрывным рыхлением пород, укладываемых в дамбу) стоимость работ согласно СНиП составила бы примерно 500 тыс. руб., т.е. более чем на 150 тыс. рублей превысила бы фактическую сметную стоимость взрывов на сброс.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА

МЕТОДОМ ЧАСТИЦ

2.1. Обзор численных математических моделей селевых и склоновых процессов.

Изучение склоновых процессов, как обвалы, оползни и сели, необходимо для их прогноза и проектирования защитных сооружений. При этом важной составляющей является определение масштабов и динамических характеристик этих процессов и явлений.

Для анализа динамики селей, обвалов и оползней используется значительное количество математических моделей. Использование математического моделирования позволяет детально количественно охарактеризовать тот или иной опасный процесс, что необходимо для его последующего количественного прогноза и управления им. Этот метод в настоящее время активно развивается и имеет большие перспективы.

Анализ существующих на данный момент численных математических моделей селевых и склоновых процессов, что необходимо для разработки новых моделей [3, 56]. В настоящее время существует большое количество численных математических моделей обвальных, оползневых и селевых процессов. Во многих из них содержится описание и апробация той или иной разработанной модели, а в других рассматривается применение ранее разработанных моделей для конкретных ситуаций. Данные литературные источники не охватывают весь набор существующих математических моделей селевых и склоновых процессов, но описывают большую часть известных моделей, принципы, работы которых опубликованы в печатных изданиях.

Следует отметить, что разработка математической модели конкретного процесса осуществляется по следующим основным этапам [56]:

1. Построение модели (выбор сценария, или механизма, процесса и его описание с применением физических законов, получение и решение уравнений с применением численных или аналитических методов, разработка алгоритма модели в среде программирования);
2. Апробация модели (реализация модели для процессов с заранее известными параметрами, ее верификация и калибровка).
3. Применение модели для прогноза процессов.

Непрерывные модели. Непрерывные модели описывают движение потока вещества как сплошной среды и применяются преимущественно для моделирования селей, оползней-потоков и блоковых оползней [2, 72, 73, 106, 107]. В их основе лежит уравнение непрерывности, а также уравнение движения вязкой жидкости Навье — Стокса в явном виде или в интегрированной по глубине гидравлической форме (в виде уравнений движения Сен-Венана) [105]. Одновременно для каждого выбранного бесконечно малого элемента пространства определяются такие его динамические характеристики, как вектор скорости и давление, на каждом последующем временном шаге с учетом его параметров и параметров соседних с ним элементов на предыдущем шаге. Система уравнений для моделей рассматриваемого типа необходимы: цифровая модель рельефа, заданные начальные и граничные условия (такие характеристики потока, как скорость и давление) и сведения об изменениях этих характеристик с течением времени.

Необходимы также данные о физических свойствах вещества потока — плотности, вязкости, угле трения, модуле упругости [5].

В результате работы моделей получают поля значений физических параметров потока вещества в различные моменты времени - векторы скорости, глубина, давление, силы и др.

Клеточные автоматы. Клеточные автоматы описывают движение потока вещества как закономерную смену состояний пространственных ячеек в направлении движения потока [71, 102, 104]. Они применяются преимущественно для моделирования селей и оползней-потоков.

В основе клеточных автоматов лежит правило, определяющее переход ячейки из одного состояния в другое. Одновременно для каждой конкретной ячейки пространства определяется ее состояние на каждом последующем временном шаге с учетом оного для нее и соседних с ней ячеек на предыдущем шаге. Рассматриваемый тип моделей базируется на различных законах физики (прежде всего на законах сохранения вещества, энергии и импульса), а также на определении наиболее вероятного направления смещения вещества, величины эрозии и диссипации энергии. Спецификой моделей данного типа является представление природного процесса не столько в виде изменений физических величин, сколько в виде закономерной последовательной смены состояний пространственных ячеек с заданными формой и размером. Под этими состояниями подразумеваются: абсолютная отметка поверхности, мощность потока, его максимально возможная глубина, содержание в нем воды, приток и отток вещества, мощность эродируемого слоя, отток и приток эродируемого материала в сторону соседних ячеек, ширина зоны ячеек, в которую осуществляется приток вещества.

Клеточные автоматы для своей работы требуют наличия цифровой модели рельефа и начальных значений физических свойств вещества потока.

В результате работы моделей данного типа, как и в случае с непрерывными моделями, получают поля значений физических параметров потока вещества в различные моменты времени — векторы скорости, глубина, давление, силы и др. В результате моделирования получается информация, полезная при рассмотрении зон распространения селей и оползней-потоков.

Дискретные модели. Дискретные модели описывают движение потока вещества в виде движения совокупности отдельных структурных частиц и применяются преимущественно для моделирования обвалов и оползней-обвалов [3, 6-27, 47, 103]. В основе этого типа моделей лежит уравнение движения структурных частиц (материальных точек или твердых тел), получаемое из второго закона Ньютона. Одновременно для каждой выбранной структурной частицы вещества определяются ее динамические характеристики (текущие координаты, вектор скорости) на каждом последующем временном шаге с учетом ее параметров и параметров, контактирующих с ней частиц на предыдущем шаге. Уравнение движения частицы i , получаемое из второго закона Ньютона описывает изменение координат каждой выбранной i -й частицы с течением времени, т.е. позволяет рассчитать траекторию движения каждой отдельной структурной частицы вещества. Данное уравнение в явном или неявном (усложненном) виде лежит в основе всех математических моделей дискретного типа. В случае учета формы частицы применяется более сложная модификация формулы - уравнение движения твердого тела, учитывающее вращение частицы и моменты сил. Для дискретных моделей необходима цифровая модель рельефа, а также заданные начальные характеристики структурных частиц движущегося вещества (начальные координаты и скорость). Необходимы также данные о физических свойствах вещества структурных частиц — размер, форма, плотность, угол трения, модуль упругости. В результате работы рассматриваемой модели получают траектории движения частиц. Для каждой выбранной частицы в каждый выбранный момент времени имеются значения ее текущих координат и вектора скорости. На основании данных о расположении частиц в пространстве в различные моменты времени можно определить скорость движения, а также морфометрические параметры потока и отложений, представляемые в виде карт. Данная информация может быть использована при установлении зон распространения обвалов и оползней-обвалов, а также при проведении

защитных мероприятий. Следует отметить, что дискретные модели могут описывать движение потока вещества либо в виде группы отдельных не соударяющихся друг с другом частиц, каждая из которых без сопротивления проходит сквозь другую (соседнюю) частицу, либо в виде группы упруго соударяющихся друг с другом частиц.

2.2. Физическая модель движения потока.

Лавинообразное движение грунтового потока как движение оползней, селей, снежных лавин, представляют собой один из видов природных процессов, на протяжении длительного периода остается одной из наиболее крупных проблем человечества. Поэтому изучение движения этих явлений являются актуальными и практически значимыми.

По характеру движения оползни-потоки, связные сели и снежные лавины близки к течению жидкости в каналах. Это позволяет для описания движения этих явлений использовать математическую модель теории мелкой воды (или теории длинных волн) [1, 2].

Данная модель движения оползневого потока основана на гидравлическом подходе (“теории мелкой воды”). Это означает, что продольный масштаб изучаемого явления должен быть много больше глубины потока и что рассматриваются средние по поперечному сечению параметры потока т. е. поток рассматривается [2, 4-9, 41] как тонкий, однородный (плотность, коэффициенты гидравлического и «сухого» трения – постоянны) слой несжимаемой жидкости. Считается, что в начальный момент смещающаяся часть грунтового (снежного) массива мгновенно дробится и превращается в «жидкость», которая затем «стекает» по склону (движение возникает из состояния покоя) (рис.2.1). Склон – переменной крутизны, длинный и широкий, т.е. эффектами, связанными с

взаимодействием с воздухом на боковых границах потока можно пренебречь. Движение потока подвержено действию силы тяжести и силы трения.

Среда, из которой состоит оползень, 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 пренебрегается (так как перемешивание практически отсутствует из-за большой разницы в плотностях воздуха и оползневой массы 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. 2.1).

Это связано с тем, что продольный масштаб движения (явления) существенно больше характерной глубины потока. Поэтому, во-первых, рассматриваются только средние по поперечному сечению (по глубине) параметры потока; в качестве искомым величин выступают глубина потока и средняя скорость вдоль дна. Во-вторых, из уравнений механики сплошной среды на основании ряда гипотез выводится система уравнений, в которую входят только эти величины.

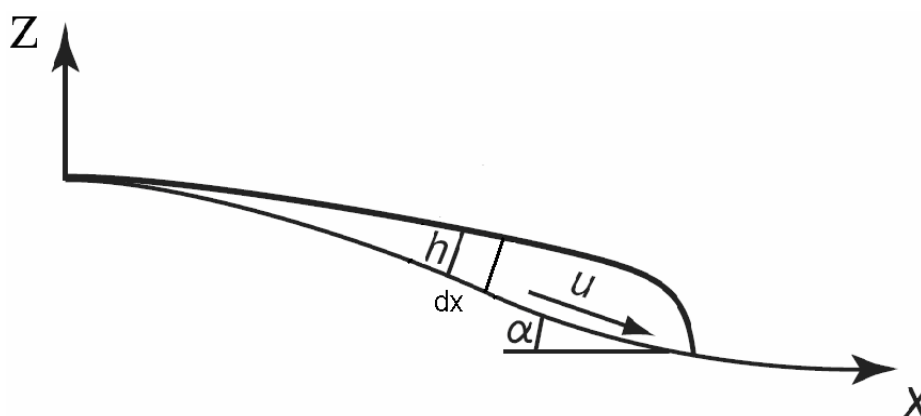


Рис. 2.1. Схема движения потока по склону.

Основное условие, при котором выводятся уравнения теории мелкой воды, имеет вид $h/L \ll 1$. Величину L будем называть характерным

масштабом явления.

В ряде разделов прикладной гидродинамики, например метеорологии и океанологии, широко используется видоизмененная модель Навье-Стокса, так называемое приближение мелкой воды (см. [58, 59]). Оно выводится из общей системы на основе асимптотического анализа в предположении, что размер области движения в одном направлении (вертикальном) много меньше, чем в другом (горизонтальном). Приближение мелкой воды в этом случае заключается в замене уравнения импульса для вертикальной составляющей вектора количества движения уравнением гидростатики. Подробнее о выводе такой модели можно прочитать, например, в [60], а впервые модель была предложена, по-видимому, Н. Е. Кочиным [61]. Вопросы существования решений краевых задач для уравнений Навье-Стокса сжимаемой вязкой жидкости изучались многими авторами, но только в одномерном случае исследованы достаточно полно (см. [72, 59]). В многомерной модели большинство ранее полученных результатов являются локальными, т. е. либо промежуток времени считается достаточно малым, либо данные задачи близки к состоянию покоя (см. [63, 64]). Системы уравнений мелкой воды изучены с достаточной степенью полноты только для несжимаемой жидкости [65–67], а для модели с учетом сжимаемости глобальных теорем существования установлено не было.

2.3. Уравнения равновесия потока.

Неустановившимся является движение, при котором скорость и давления жидкости меняется с течением времени. В этом случае скорость и давление является функцией не только положения и ее отдельной точки, относительно выбранных координат, но и времени. Средняя скорость в живом сечении потока и расход изменяется по времени. Для получения

уравнения описывающего изменения гидродинамических характеристик потоков при неустановившемся движении используется уравнение неустановившегося движения для элементарной струйки несжимаемой жидкости.

Рассмотрим неустановившееся движение несжимаемой жидкости. В потоке жидкости выделим элементарную струйку.

На рисунке 2.2 изображена элементарная струйка, в которой выделяем сечение 1-1 и 2-2 на расстоянии dl друг от друга. В сечении 1-1 давление P_1 , и в сечении 2-2 давление P_2 .

Так как движение неустановившееся, то давление и скорость в выделенных сечениях являются функцией переменных: длины и времени, $P = P(l, t)$ и $u = u(l, t)$.

В связи с этим давление

$$P_2 = P_1 + \frac{\partial p}{\partial l} dl \quad (2.1)$$

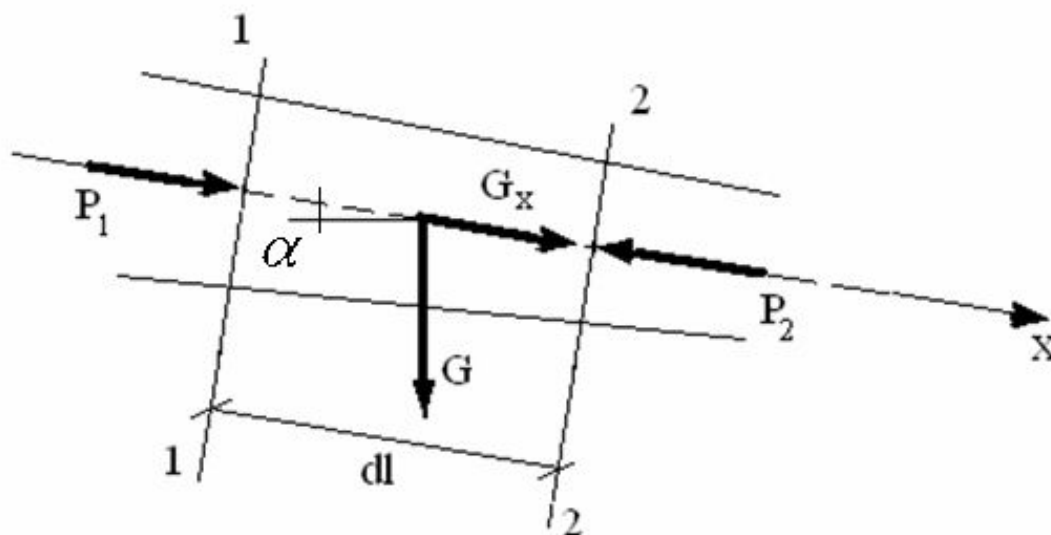


Рис. 2.2. К выводу дифференциального уравнения неустановившегося движения

Приращение скорости на участке dl

$$du = \frac{\partial u}{\partial t} dt + \frac{\partial u}{\partial l} dl \quad (2.2)$$

Рассмотрим силы, действующие на объем части струйки, заключенные между сечениями 1-1 и 2-2.

Силы гидродинамического давления в сечениях 1-1 и 2-2

$$dF_1 = P_1 d\omega, \quad dF_2 = P_2 d\omega, \quad dF_1 = \left(P_1 + \frac{\partial P}{\partial l} dl \right) d\omega, \quad (2.3)$$

где $d\omega$ - площадь сечения.

Сила тяжести для рассматриваемого объема жидкости

$$G = \rho g d\omega dl \quad (2.4)$$

Здесь ρ - плотность жидкости, g - ускорение свободного падения.

Сила сопротивления со стороны окружающей струйку массы жидкости

$$dT = \tau dl, \quad (2.5)$$

где τ - касательное напряжение.

Сила инерции массы данного объема, возникающая в результате изменения скорости с течением времени

$$dF_a = \rho d\omega dl \frac{du}{dt} \quad (2.6)$$

Проектирую все силы на ось ox по направлению движения, запишем уравнение динамического равновесия выделенного объема струйки в следующем виде:

$$F_1 - F_2 + G \sin \alpha - \tau dl = \rho d\omega dl \frac{du}{dt} \quad (2.7)$$

Здесь $\Delta m = \rho d\omega dl$ - масса объема жидкости заключенное между сечениями 1-1 и 2-2.

Учитывая, что угол α - наклон оси струйки к оси ox

$$\Delta m \frac{du}{dt} = F_1 - F_2 - \tau dl + \Delta mg \sin \alpha \quad (2.8)$$

Обе части уравнения (2.8) умножим на u – скорость

$$\Delta mu \frac{du}{dt} = (F_1 - F_2 - \tau dl + \Delta mg \sin \alpha) u \quad (2.9)$$

Правая часть преобразуется к виду

$$\Delta mu \frac{du}{dt} = \Delta m \frac{1}{2} \frac{du^2}{dt}$$

и после подстановки в (2.9) получим

$$\Delta m \frac{d}{dt} \left(\frac{u^2}{2} \right) = (F_1 - F_2 - \tau dl + \Delta mg \sin \alpha) u$$

Отсюда имеем

$$\Delta m \left(\frac{u^2(t+dt)}{2} - \frac{u^2(t)}{2} \right) = (F_1 - F_2 - \tau dl + \Delta mg \sin \alpha) u dt \quad (2.10)$$

Таким образом, из (2.10) можно увидеть, что изменение кинетической энергии частицы равно работе внешних сил на перемещение частицы на некоторое расстояние $dx = udt$.

Учитывая, что давления равна

$$P = \rho g h d\omega$$

и разделив обе части (2.10) на $\rho d\omega dl$ получим

$$\frac{du}{dt} = - \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial l} - g \sin \alpha + \tau_o \right) \quad (2.11)$$

уравнение равновесие элемента потока.

2.4. Уравнение неразрывности.

В дальнейшем будем считать, что массы частицы не меняется, т.е.

$$m = \rho z z = const \quad (2.12)$$

Продифференцировав, (2.15) получим

$$hdz + zdh = 0. \quad (2.13)$$

Отсюда имеем

$$dh = - \frac{h}{z} dz. \quad (2.14)$$

Это формула показывает, что изменение высоты и ширины частицы пропорциональны. На рисунке V_p и V_l соответственно скорости на правых и левых концах частицы.

Ширина частицы за dt времени увеличится на величину

$$dz = (V_p - V_l)dt \quad (2.15)$$

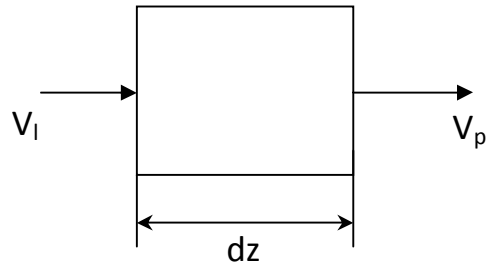


Рис.2.3. Для вывода уравнения неразрывности.

Отсюда можно определить скорость изменение ширины частицы

$$\frac{dz}{dt} = (V_p - V_l) \quad (2.16)$$

Тогда из уравнения можно определить скорость изменение высоты частицы

$$\frac{dh}{dt} + \frac{h(V_p - V_l)}{z} = 0 \quad (2.17)$$

Отсюда можно получить

$$V_p = V_l - \frac{z}{h} \frac{dh}{dt} \quad (2.18)$$

или

$$\begin{aligned} u &= V_l - \frac{x}{h} \frac{dh}{dt}, \quad \text{здесь } 0 \leq x \leq z \\ u &= u_c - \frac{x}{h} \frac{dh}{dt}, \quad \text{здесь } -z/2 \leq x \leq z/2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Здесь u_c скорость в центре частицы.

Если ширины частицы уменьшить, то получим уравнению неразрывности несжимаемой жидкости

$$\frac{dh}{dt} + \frac{h(V_p - V_l)}{z} = \frac{dh}{dt} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Отсюда можно получить известную уравнению неразрывности несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \quad (2.20)$$

Высота частицы и ее производная в пределах частицы постоянная, т.е. являются функциями только от t времени

$$\frac{dh}{dt} = -h(t) \frac{\partial u}{\partial x}$$

Это возможно только тогда когда

$$\frac{\partial u}{\partial x} = const$$

В дальнейшем примем, что ускорение аппроксимируется линейной функцией.

2.5. Дифференциальное уравнение неустановившегося движения несжимаемой вязкой жидкости.

Приращение скорости на участке dl представим в следующем виде

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial l} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial l} \frac{1}{2} \quad (2.21)$$

Тогда уравнение равновесие имеет вид

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial l} \frac{1}{2} \right) = - \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial l} + \tau - g \sin \alpha \right) \quad (2.22)$$

Преобразовав последнее выражение, получим уравнение в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{u^2}{2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial l} \right) + (\tau - g \sin \alpha) = 0 \quad (2.23)$$

Выражение (2.23) является дифференциальным уравнением неустановившегося движения элементарной струйки несжимаемой вязкой жидкости.

Умножим уравнение (2.23) на dl и проинтегрируем в пределах струйки от l_1 и l_2 в фиксированный момент времени

$$\int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial u}{\partial t} dl + \int_{u_1}^{u_2} \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{u^2}{2} \right) dl + \frac{1}{\rho} \int_{P_1}^{P_2} \frac{\partial p}{\partial l} dl + \int_{l_1}^{l_2} (\tau - g \sin \alpha) dl = 0$$

И преобразуем к следующему виду

$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{1}{\rho} P_1 = \frac{1}{\rho} P_2 + \frac{u_2^2}{2} + \int_{l_1}^{l_2} (\tau - g \sin \alpha) dl + \int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial u}{\partial t} dl \quad (2.24)$$

Сгруппировав скорости частицы в левую сторону равенства, получим

$$\frac{u_1^2}{2} - \frac{u_2^2}{2} = \frac{1}{\rho} P_2 - \frac{1}{\rho} P_1 + \int_{l_1}^{l_2} (\tau - g \sin \alpha) dl + \int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial u}{\partial t} dl \quad (2.25)$$

После несложного преобразование имеем

$$u_c(u_1 - u_2) = \frac{1}{\rho}(P_2 - P_1) + \int_{l_1}^{l_2} (\tau - g \sin \alpha) dl + \int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial u}{\partial t} dl \quad (2.26)$$

Уравнение (2.26) называется основным уравнением неустановившегося движения для элементарной струйки несжимаемой вязкой жидкости. Это уравнение по своей структуре аналогично уравнению Бернулли. В правой части, которого первый интеграл выражает потери на трение и преодоление силы тяжести, второе отражает влияние сил инерции.

Интеграл $\int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial u}{\partial t} dl$ -называется инерционным напором $h_{ин}$.

Интеграл $\int_{l_1}^{l_2} \tau dl$ - гидравлические потери по длине h_τ

В зависимости от вида ускорения движения инерционный напор может быть как положительным, так и отрицательным. Для ускоренного движения потока интеграл положительный, а для замедленного движения – отрицательный.

Если локальное ускорение постоянно по длине участка, инерционный напор, таким образом, равен

$$h_{ин} = \int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial u}{\partial t} dl = \frac{\partial u}{\partial t} (l_2 - l_1) = \frac{\partial u}{\partial t} l$$

Если локальное ускорение аппроксимируется линейной функцией

$$h_{ин} = \int_{l_1}^{l_2} \frac{\partial u}{\partial t} dl = \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{cp} (l_2 - l_1) = \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{cp} l$$

Здесь $\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{cp}$ - локальное ускорение в центре частицы.

Подобно потерям напора инерционный напор влияет на величину полной удельной энергии во втором сечении. Величина и знак инерционного напора зависят от величины и направления ускорения потока. При замедляющемся движении ($a < 0$) напор будет отрицательным, т.е. на пути между сечениями будет высвободиться кинетическая энергия, и если потери напора по длине участка будут сравнительно невелики ($h_l < h_{ин}$), то полный напор для данного момента времени между расчетными сечениями будет возрастать. При положительном ускорении потока ($a > 0$) за тот же промежуток времени между сечениями удельная энергия жидкости уменьшается.

2.6. Закон сохранения энергии потока.

Рассмотрим течение несжимаемой идеальной жидкости. Полагая течение квазиодномерным, запишем систему уравнений для такого течения в виде [3]

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = - \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \tau - g \sin \alpha \right) \end{cases} \quad (2.27)$$

Приняв $D = \frac{1}{h} \frac{dh}{dp}$ и подставив на первое уравнение системы (2.27) получим

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} + p \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{du}{dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - A \end{cases} \quad (2.28)$$

Где $A = \tau - g \sin \alpha$.

Умножив второе уравнение системы (2.28) на ρu и сложив первым уравнением получим

$$\frac{d}{dt} \left(p + \rho \frac{u^2}{2} \right) + \frac{\partial p u}{\partial x} = -\rho A u. \quad (2.29)$$

Это тождество носить название закона сохранения энергии.

Из последнего тождества следует, что по любому кусочно-гладкому замкнутому контуру

$$\oint \left(p + \rho \frac{u^2}{2} \right) dx + p u dt = - \oint \rho A u dx dt$$

Учитывая, что $u dt = ds$ - есть перемещение.

Чтобы пояснить «закон сохранения энергии», применим наше интегральное тождество к прямоугольному контуру ABCDA, изображенному на рис.2.5.

Мы получаем равенство

$$\int_D^C \left(p + \rho \frac{u^2}{2} \right) dx = \int_A^B \left(p + \rho \frac{u^2}{2} \right) dx + \int_A^D p u dt - \int_B^C p u dt - \left(\int_D^C \rho A \delta s dt - \int_A^B \rho A \delta s dx \right)$$

В этом равенстве $\int_A^B \left(\rho \frac{u^2}{2} \right) dx$ изображает кинетическую энергию

потока, заключенного при $x_1 < x < x_2$ в начальный момент времени t_0 ; $\int_A^B p dx$ -

потенциальная энергия потока. $\int_D^C \left(p + \rho \frac{u^2}{2} \right) dx$ - полная энергия в момент времени t_1 .

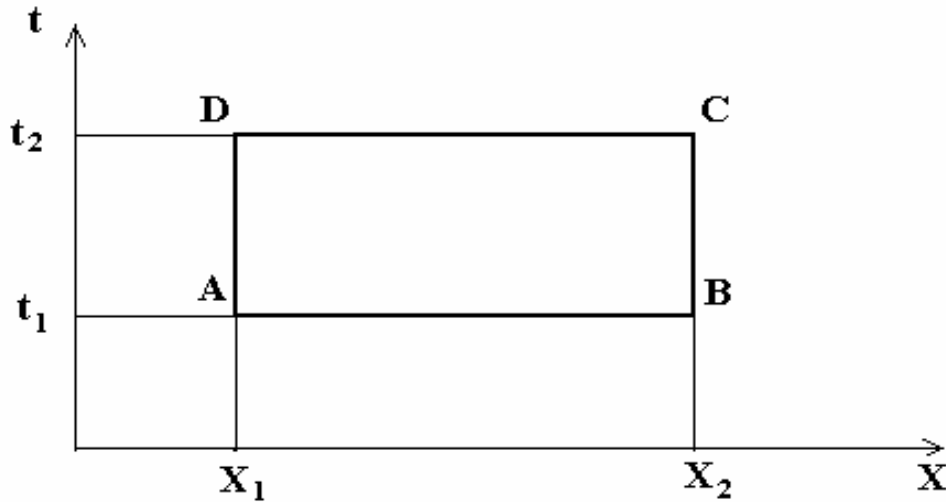


Рис. 2.5. К выводу закона сохранения энергии

Разность $\int_A^D p u dt - \int_B^C p u dt$ представляет собой работу совершенную над потоком за интервал времени (t_0, t_1) . А разность интегралов $\left(\int_D^C \rho A \delta s dt - \int_A^B \rho A \delta s dx \right)$ представляет работу внешних сил на перемещение потока.

2.7. Дискретизация потока.

Математическое моделирование движения грунтового потока, приводит к дискретизации неизвестных функций. Методы дискретизации, используемые при создании вычислительных моделей, включают в себя конечно-разностные методы, методы конечных элементов и метод, который был выбран для расчетов в данной работе – метод частиц. Термин «модели частиц» является общим для класса вычислительных моделей, в которых дискретное описание физических явлений включает использование

взаимодействующих частиц. Каждая частица имеет набор атрибутов, таких как масса, заряд, завихренность, положение, импульс. 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, становится достаточно эффективным. Также из положительных качеств метода можно отметить возможность использования неравномерной сетки. 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. Связь между частицами вычислительной модели и частицами физической системы в значительной степени определяется соотношениями ограниченных вычислительных ресурсов и характерных пространственных и временных масштабов физических систем. 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.

Строгие математические постановки обобщенных задач можно найти в [4]. Считается, что в начальный момент смещающаяся часть грунтового массива расщепляется в поток жидких частиц, распространяющихся по склону. Взаимодействие с воздухом на боковых границах пренебрежимо мало. Движение потока подвержено действию силы тяжести и силы трения, нет внешних притоков массы.

Заданный поток разбивается на n число прямоугольников – частиц (рис. 2.6).

Если угол между горизонтом и осью симметрии частицы равен α , то высоту частицу необходимо умножить на $\cos \alpha$.

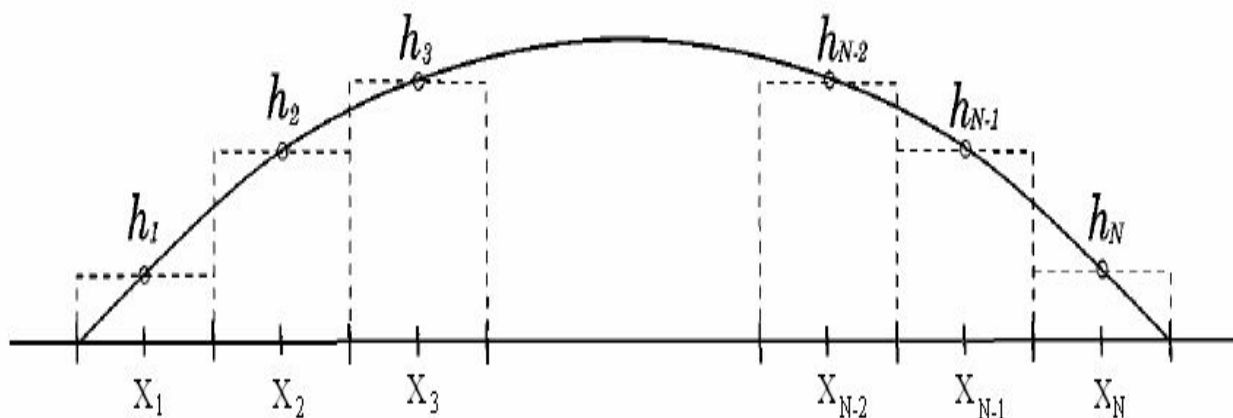


Рис. 2.6. Аппроксимация частицами-прямоугольниками произвольной параболы. Точками обозначены центры частиц.

Подставляя (2.45) в (2.11) для i -частицы получим

$$\left(\frac{du}{dt} \right)_i = - \left(\frac{g}{2} \frac{\partial(h \cos \alpha)}{\partial x} - g \sin \alpha + \tau \right)_i \quad (2.30)$$

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.

По закону сохранения импульса гласит, что сумма импульсов замкнутой системы равна сумме внешних сил

$$\sum (mu)_i = \sum R_i \quad (2.31)$$

2.8. Силы трения потока.

Рассматривая вопрос о выражении для силы трения, принимается во внимание, что для потоков жидкостей выражение для силы трения имеет следующий вид:

$$\tau = k_2 u^2, \quad (2.32)$$

где u – величина скорости в потоке, k_2 – коэффициент трения.

Данные о величинах k_2 приводятся в гидравлических справочниках. Для потоков, содержащих глину и камни, типа селей и глинистых растворов рекомендуются формулы вида $\tau = \tau_c + k_2 u^2$ [2]. Величина τ_c называется сухим трением и вычисляется с помощью закона Кулона (трение пропорционально нормальному давлению). Для потока на поверхности это означает, что $\tau_c = k_c g h \cos \alpha$, где k_c – коэффициент кулоновского трения.

Поэтому выражение для τ_x принимает следующий вид [2]:

$$\tau_x = \text{sign}(u) k_2 u^2 + g h k_c \cos \alpha \quad (2.33)$$

Полученная таким образом система уравнения используется для описания движения снежных лавин, селей, горных обвалов, оползней-обвалов и оползней больших объемов.

Начальным условием для поставленной задачи будет распределение $u(x, t)$ и $h(x, t)$ на отрезке, малом по сравнению с характерным размером исследуемого потока и большом по сравнению с $h_o(x)$:

$$\begin{cases} u(x, t)|_{t=0} = u_o(x) \\ h(x, t)|_{t=0} = h_o(x) \end{cases} \quad x \geq x_o \quad (2.34)$$

Для расчета конкретных вариантов движения потоков различной природы по склону необходимо задать числовые значения коэффициентов

трения k_c , k_2 и геометрические характеристики склона и водного, селевого или оползневого потока, определяемые функциями $\alpha(x)$, $h_o(x)$, $u_o(x)$.

В [4] справедливо замечено, что значения параметров k_c , k_2 , вообще говоря, нельзя считать неизменными в процессе движения обвала или оползня, так как они зависят, например, от гранулометрического состава обвального потока или оползневого тела, который меняется и вдоль потока (особенно в случае оползней-обвалов) и во времени. Однако в настоящее время нет данных о закономерностях этих изменений, поэтому в расчетах все перечисленные параметры считаются константами, не зависящими от x и t . На основании данных о типичных углах β естественного откоса горных осыпей для коэффициентов сухого трения $k_c \approx tg\beta$ в работе [4] предлагается следующий диапазон изменений для k_c : $0,55 \leq k_c \leq 0,85$, и для k_2 : $0,01 \leq k_2 \leq 0,1$.

Необходимо отметить, что выражение для силы трения имеет различный вид для остановившихся и находящихся в движении частей потока. Это связано с тем, что пока активная сила (которая складывается из составляющей силы тяжести ($g \sin \alpha$) и градиента гидростатического давления) $\frac{\partial(gh \cos \alpha)}{\partial x}$ меньше чем сила трения, движение в остановившей части потока не может начаться. Поэтому выражение для силы трения принимает следующий вид ($\tau_c = k_c g \cos \alpha$) [5]:

1) при $u \neq 0$:

$$\tau_c = \tau_c \operatorname{sign}(u)$$

2) при $u = 0$:

$$\tau_c = \begin{cases} -g \sin \alpha - \frac{\partial(gh \cos \alpha)}{\partial x}, & \left| -g \sin \alpha - \frac{\partial(gh \cos \alpha)}{\partial x} \right| < \tau_c \\ \tau_c \operatorname{sign} \left(-g \sin \alpha - \frac{\partial(gh \cos \alpha)}{\partial x} \right), & \left| -g \sin \alpha - \frac{\partial(gh \cos \alpha)}{\partial x} \right| \geq \tau_c \end{cases} \quad (2.35)$$

Решение уравнения (2.30) имеет ряд моментов, которые следует отметить. Вычисление силы трения осуществляется в соответствии с формулами (2.33), (2.35). Данный алгоритм был реализован, и на его основе было проведено математическое моделирование движения оползневых потоков по наклонным поверхностям. Основными входными параметрами построенной вычислительной системы являются коэффициенты трения k_c , k_z , профиль склона, определяемый функцией $\alpha(x)$, и характеристики исследуемого потока, определяемые функциями $h_o(x)$, $u_o(x)$. Основными выходными параметрами являются распределение мощности, и скорости потока во времени и величина пройденного пути, как наиболее важные характеристики любого склонового процесса.

2.9. Квадратичное аппроксимация давление [36].

Рассмотрим неустановившееся движение несжимаемой жидкости. Уравнения равновесия имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} + p \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \end{cases} \quad (2.36)$$

Вводим набор частиц с координатами $x_i(t)$, $i = 1, \dots, N$. В одномерном случае частицы имеют форму прямоугольников [2]. Важным моментом является тот факт, что частицы-прямоугольники соприкасаются друг с другом (они не перекрывают друг друга и не образуют пустот между собой). Середины основания прямоугольников являются координатами частиц.

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

$$p(x,t) = \frac{m}{2}(x - q)^2 + b(x - q) + c. \quad (2.37)$$

Здесь q, b, c коэффициенты, которые подлежат к определению.

Система координат расположена в центре интервала $x=q$, а ширина частицы прямоугольника равна ℓ .

Первая производная имеет вид

$$\frac{\partial h}{\partial x} = m(x - q) + b.$$

В середине частицы – прямоугольника, т.е. при $x = q$, $\frac{\partial p(q, t)}{\partial x} = b$.

Вторая производная давление

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = m.$$

Таким образом, в пределах частицы – прямоугольника вторая производная будет постоянной.

В центре частицы – прямоугольника $p(q, t) = c$, т.е. c равно давлению потока в центре частицы.

Таким образом, функция давления окончательно имеет вид

$$p(x, t) = p(q, t) + (x - q) \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=q} + \frac{(x - q)^2}{2} \left. \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right|_{x=q} \quad (2.38)$$

Теперь выясним что, означает производные функции давление потока. Из уравнения равновесие для первой производной имеем

$$b = \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=q} = -\rho \left. \frac{du}{dt} \right|_{x=q} \quad (2.39)$$

где ρ – плотность жидкости.

Коэффициент b равно ускорению в центре частицы-прямоугольника.

Продифференцировав второе уравнение системы (2.36) и после несложных преобразований получим

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = -\rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{du}{dt} \right). \quad (2.40)$$

Продифференцировав первое уравнение, по времени имеем

$$p \frac{d^2 p}{dt^2} - 2 \left(\frac{dp}{dt} \right)^2 + p^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{du}{dt} \right) = 0. \quad (2.41)$$

Для упрощения уравнения примем подстановку

$$p = \frac{s}{z},$$

где S – некоторая постоянная и Z -ширина частицы-прямоугольника.

Производные, которые равны

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= -\frac{s}{z^2} \frac{dz}{dt} \\ \frac{d^2 p}{dt^2} &= s \left[-\frac{1}{z^2} \frac{dz}{dt} + \frac{2}{z^3} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.42)$$

Подставляя подстановку (2.38) в уравнение (2.42), получим ускорение изменение ширины частицы-прямоугольника

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

Область частицы – прямоугольника мысленно разбивается на большое число частиц близкими друг к другу, плоскими сечениями (рис.2.7). Каждую частицу соответствуют свои значения ускорения.

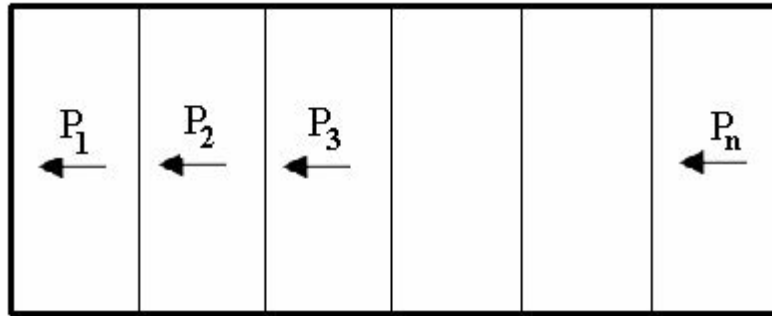


Рис. 2.7. Частица – прямоугольник разбивается элементарные частицы.

Распределение ускорений вдоль оси частицы – прямоугольника в каждый момент непрерывно, поэтому в двух близких друг к другу частицах ускорения мало разнятся между собой. Тогда движение рассматривают как совокупность непрерывно следующих друг за другом элементарных частиц, причем каждая последующая частица перемещается, возмущенной 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 складываются и образуют одну силу-силу инерции частицы – прямоугольника, т.е. интегрировать вдоль ширины частицы

$$\rho \int_0^{x-q} \frac{d^2 z}{dt^2} dz = \rho \frac{(x-q)^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{du}{dt} \right) \Bigg|_{x=q} \quad (2.43)$$

Подставляя (2.40) и (2.43) в (2.38) получим

$$p(x,t) = p(q,t) - \rho(x-q) \frac{du}{dx} \Big|_{x=q} - \rho \frac{(x-q)^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{du}{dt} \right) \Big|_{x=q} \quad (2.44)$$

Здесь первое слагаемое $p(q,t)$ - давление в середине частицы-прямоугольника, а второе $\rho(x-q) \frac{du}{dx} \Big|_{x=q}$ - давление от равноускоренного движения частицы-прямоугольника. Распределение давления на частице - прямоугольнике представлена на рисунке 2.8.

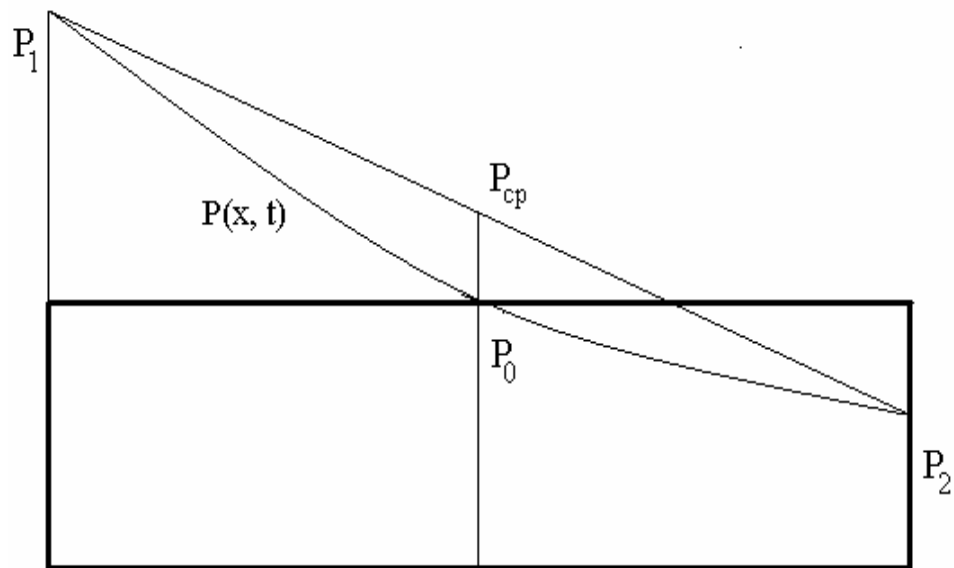


Рис.2.8. Линия давления. Жирной линией отмечена частица-прямоугольник. P_1 -давление на левой границе частицы; P_2 -на правой границе частицы и P_0 -в середине частицы.

На левом конце $x - q = -\ell/2$ частицы-прямоугольника давление равен

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

На другом конце, т.е. при $x - q = \ell/2$

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

Складывая последние две уравнения получим

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

Отсюда имеем

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

Здесь вторая, слагаемая правой части выражения есть среднее значение усилий, действующее на частицу со стороны соседних частиц-прямоугольников.

$$\rho \frac{1}{2} \left(\frac{\ell}{2} \right)^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{du}{dt} \right) \Big|_{x=q} = p(q, t) - p_{cp} \quad (2.45)$$

Выражение на левой части уравнения (14) - $\rho \frac{1}{2} \left(\frac{\ell}{2} \right)^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{du}{dt} \right) \Big|_{x=q}$ есть сумма

сил инерции в частицах жидкости, которые уравнивают лишнее давление $p(q, t) - p_{cp}$ на соседних частицах - прямоугольниках (см. рис. 2.9).

Это означает, что ускорение в частицах должна быть такими, чтобы силы инерции вызванные этими ускорениями уравновесили давление $p(q, t) - p_{cp}$

С учетом (2.40) из (2.47) получим выражение для второй производной

$$\left. \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right|_{x=q} = \frac{p(q,t) - p_{cp}}{\frac{1}{2} \left(\frac{\ell}{2} \right)^2} \quad (2.46)$$

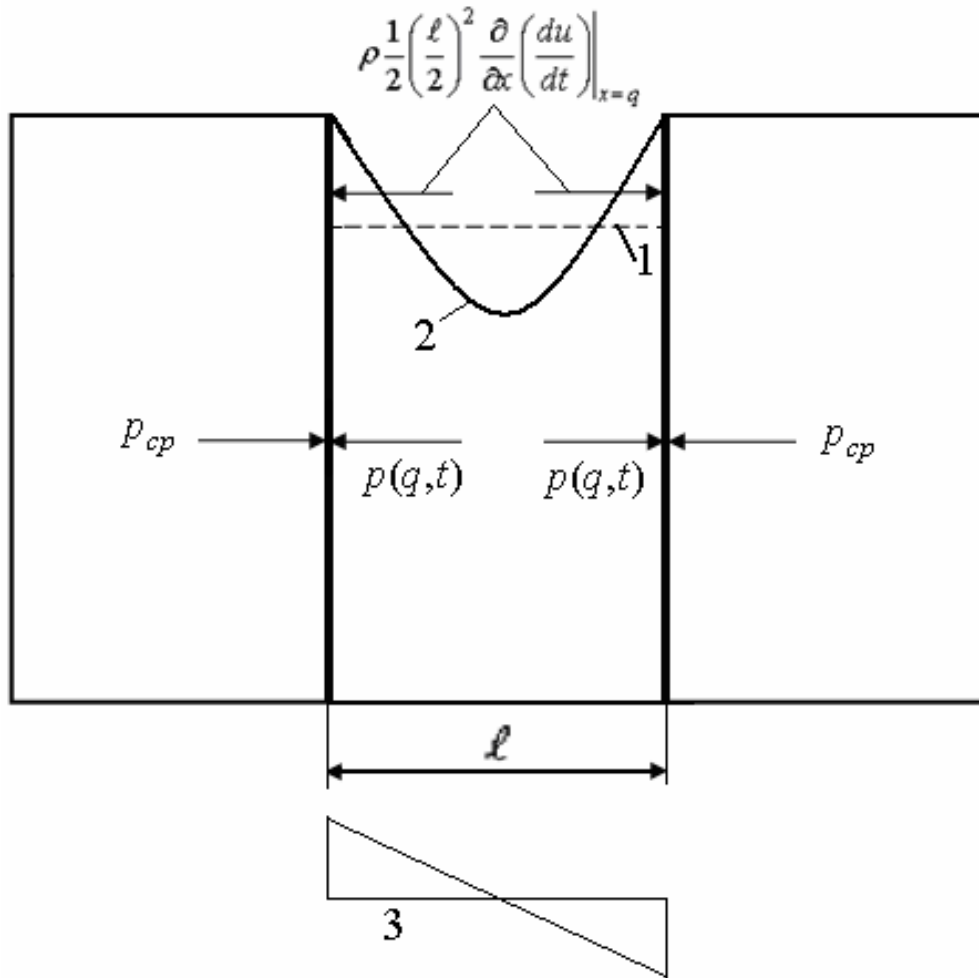


Рис.2.9. Взаимодействие частиц. 1- уровень средней частицы, 2- кривая давления на средней частице, 3- график ускорение частицы.

Уравнения равновесия с учетом трения имеет вид

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

Отсюда получим выражение для первой производной функции давления

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

Продифференцировав последнее уравнение, получим

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

Отсюда имеем

$$\rho \frac{\partial}{\partial x} \frac{du}{dt} = -\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \text{sign}(u) \rho k_c 2u \frac{\partial u}{\partial x} - k_c \frac{\partial p}{\partial x} + g \cos \alpha \frac{\partial \alpha}{\partial x} \quad (2.47)$$

Таким образом, давление на частице во время неустановившегося движение определяется из трех оставляющих:

1. Статическое давление $p(q,t) = \rho gh(q,t)$. Это статическое давление, во всех сечениях частицы-прямоугольника одинаково.
2. Вторая слагаемая есть давление на сечениях частицы-прямоугольника от сила инерции, вызванное разностью давлений в соседних частицах. Разность давлений в соседних частицах, средней частице-прямоугольнике 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 частицах средней частицы возникают ускорения. Силы инерции от этих ускорений должны

уравновешивать действие соседних частиц. Давление в средней частице имеют форму параболы. Ускорение частицы определяется прямой и они симметричны относительно средней точки. Эта давление вызывает изменение размеров частицы.

2.10. Алгоритм решения задачи.

Алгоритм моделирования движения грунтового потока на наклонной поверхности:

1. Задается цифровая модель рельефа, размеры воронки взрыва и поверхность скольжения возможной призмы обрушения.
2. заданные 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 ρ , вязкости k_c , коэффициенте трения k_r .
4. Дискретизация призму возможного обрушения на частицы – прямоугольники (задание h_i и u_i).
5. Задание конечное значение времени T .
6. Вычисление ускорение частицы - прямоугольников $a_i(t)$ по формуле

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

Здесь следуя [68], производную $\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_i = \frac{p_{i+1}(t) - p_{i-1}(t)}{x_{i+1}(t) - x_{i-1}(t)}$ заменим на

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_i = \frac{p_{i+1}(t) - p_{i-1}(t)}{2z_i(t)}.$$

7. Вычисление дополнительного давления на частице – прямоугольнике вызванное от действием соседних частиц

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

8. Определение изменение ускорения на частице-прямоугольнике

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

9. Определить ускорение на границах частицах-прямоугольниках

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

(+ правая граница, - левая граница).

10. Определяется скорости:

$$- \text{В центре частицы } u(t + dt) = u(t) + a(t) * dt$$

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

11. Координаты центров и границы частиц-прямоугольников определяется по формулами:

$$x(t + dt) = x(t) + u(t) * dt$$

$$X_{\pm}(t + dt) = X_{\pm}(t) + U_{\pm}(t) * dt$$

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

12. Изменение высоты потока определяется из уравнения неразрывности

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

$$h(t + dt) = h(t) + dh$$

12. Проверка времени вычисления, если $t \leq T$ вычисление продолжается,

вернувшись на шаг 5, в противном случае вычисление

останавливается.

13. Получение необходимые выходные данные.

2.11. Тестирование программы на модельных задачах.

Далее приведем результаты расчета движения грунтовых-потоков различной природы по наклонной поверхности, полученные при решении задачи методом частиц. На всех графиках по оси x нанесено значение $x(\text{м})$, точками изображены значения скоростей частиц $u(\text{м/с})$, прямоугольниками– частицы, отвечающие за мощность потока $h(\text{м})$.

1. Задача о разрушении плотины. В [29] решена задача о разрушении плотины в горизонтальном бесконечном длинном канале. Рассмотрим горизонтальный канал постоянного поперечного сечения, простирающийся до бесконечности в обе стороны, который имеет тонкую перегородку в сечении $x = x_1$ (рис. 2.9).



Рис. 2.9. К задаче о разрушении плотины

При $x < x_1$ вода имеет глубину h_1 , а при $x > x_1$ – глубину $h_0=0$. Первоначально вода предполагается покоящейся по обе стороны плотины. В момент времени $t = 0$ плотина внезапно разрушается. При этом процесс

движения жидкости будет описываться системой уравнений мелкой воды, следующего вида:

$$\begin{cases} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \cos \alpha \right)}{\partial x} = 0 & x \geq x_o \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (2.48)$$

с начальными условиями:

$$\begin{cases} u(x,t)|_{t=0} = 0 \\ h(x,t)|_{t=0} = h_o \end{cases} \quad (2.49)$$

Решение системы (2.48) таково:

$$\begin{aligned} u(x,t) &= \frac{2}{3} \left(c_o + \frac{x}{t} \right), \\ h(x,t) &= \frac{1}{9g} \left(2c_o - \frac{x}{t} \right)^2 \\ c_o &= \sqrt{gh_o} \end{aligned} \quad (2.50)$$

Из формулы (2.50) видно, что глубина и скорость в створе плотины постоянны и форма свободной поверхности парабола.

Как видно из начального условия (2.49) функция $h(x,t)$ в точке $x = x_1$ терпит разрыв. При $t > 0$ этот разрыв мгновенно сглаживается, а поверхность части жидкости, находящейся в движении, принимает форму параболы (рис. 2.11), касающейся оси x (т.е. дна) в точке $x = x_1 + 2c_1t$. Указанная парабола проходит от фронта волны до точки $x = x_1 - c_1t$, после которой поверхность жидкости становится горизонтальной ($c_1 = \sqrt{gh_o}$).

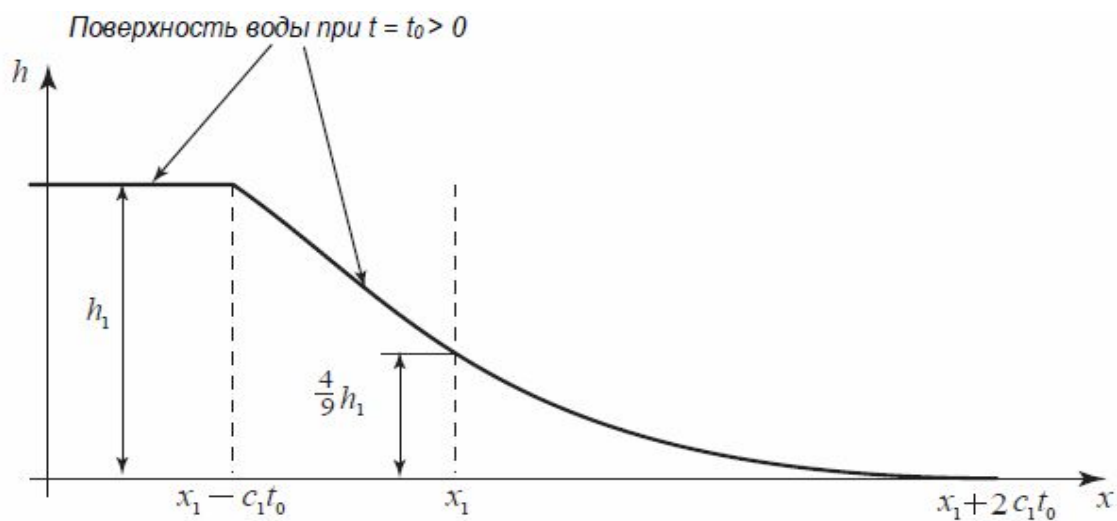


Рис. 2.10. Решение задачи о разрушение плотины при $h_0 = 0$.

Интересно отметить некоторые особенности процесса в случае $h_0 = 0$. На рис. 2.11 представлен уровень жидкости h в зависимости от x для различных моментов времени. Как видно из рисунка расход воды в створе плотины постоянен в силу постоянства глубины и скорости в этой точке.

Эта особенность процесса разрушения плотины была отмечена в [29] и подтверждена при численном решении задачи.

При этом высота свободной поверхности непрерывна всюду и монотонно возрастает при движении от фронта потока влево, а скорость частиц воды падает по абсолютной величине. Это тот случай, когда поршень, находящийся в точке x_1 , начинает двигаться вправо. Ускорение поршня предполагается бесконечным, так что его скорость внезапно меняется от нуля до постоянного конечного значения, при котором происходит отрыв поршня от воды и последующее движение поршня не оказывает влияния на движение воды.

Численное решение задачи о разрушении плотины, полученное предложенным методом [40], представлено на рис. 2.12.

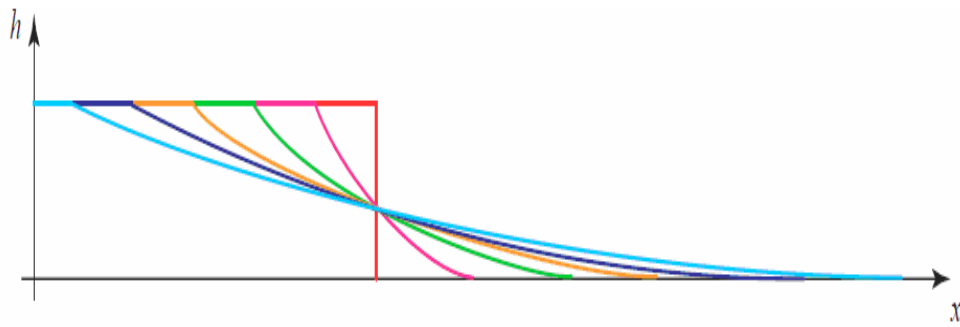


Рис. 2.11. Уровень воды выше и ниже плотины для различных моментов времени.

Точками на графиках изображены значения скоростей частиц u , прямоугольниками – частицы, отвечающие за уровень жидкости h . Результаты численного предложенного метода была сравнено результатами – решение, полученное в [29]. 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.

Численные расчеты показывает, что при малых значениях t численные и аналитические расчеты намного отличается (рис.2.12), с увеличением t результаты постепенно совпадает (рис. 2.13).

Теория мелкой воды, строго говоря, несправедлива в начальной стадии. Поскольку характерная длина по горизонтали мала, но по мере развития течения величина h_o^2 / l^2 становится малой и реальная течение описывается довольно хорошо. Следует отметить, что $h = 4h_o / 9$, $u = 2\sqrt{gh_o / 3}$ остаются постоянными в месте расположения плотины $x = 10$ для всех $t > 0$. Скорость фронта существенно изменяется трением.

Порядок величин в сделанном приближении принятой в теории мелкой воды для u и h имеет порядок $\rho h_o u_t$, $u \approx -h_o u_{xx}$. Поэтому относительная ошибка

имеет порядок [28]: $\frac{-p_x}{\rho u_t} \approx \frac{h_o^2 u_{xxt}}{u_t} \approx \frac{h_o^2}{l^2}$. Уменьшение ширины частицы

повышает точность решения задачи (см. рис. 2.13 и 2.14).

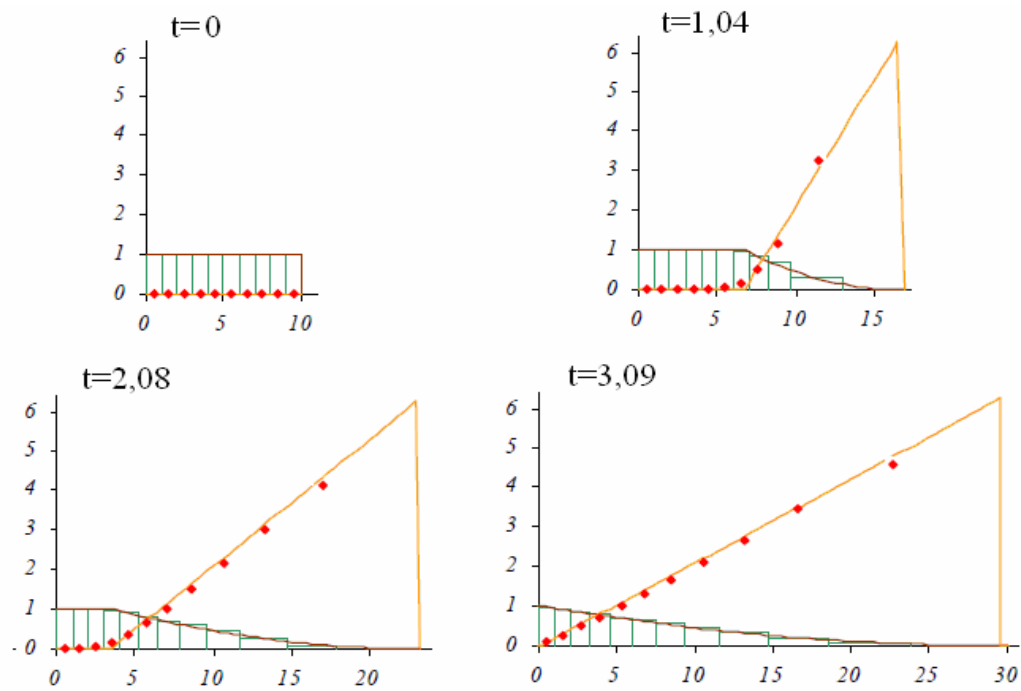


Рис.2.12. Решение задачи о прорыве плотины.

Плотина находится в точке $x = 10$.

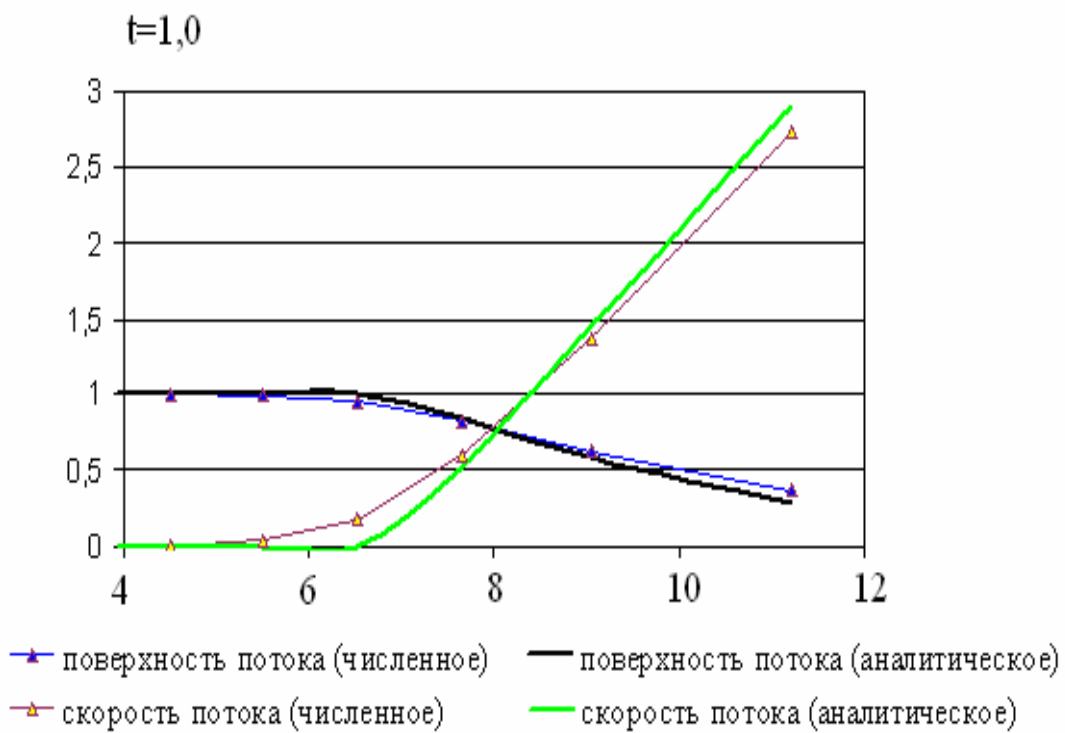


Рис.2.13. Изменение высоты и скоростей потока, при $h = 1$, $l = 1$.

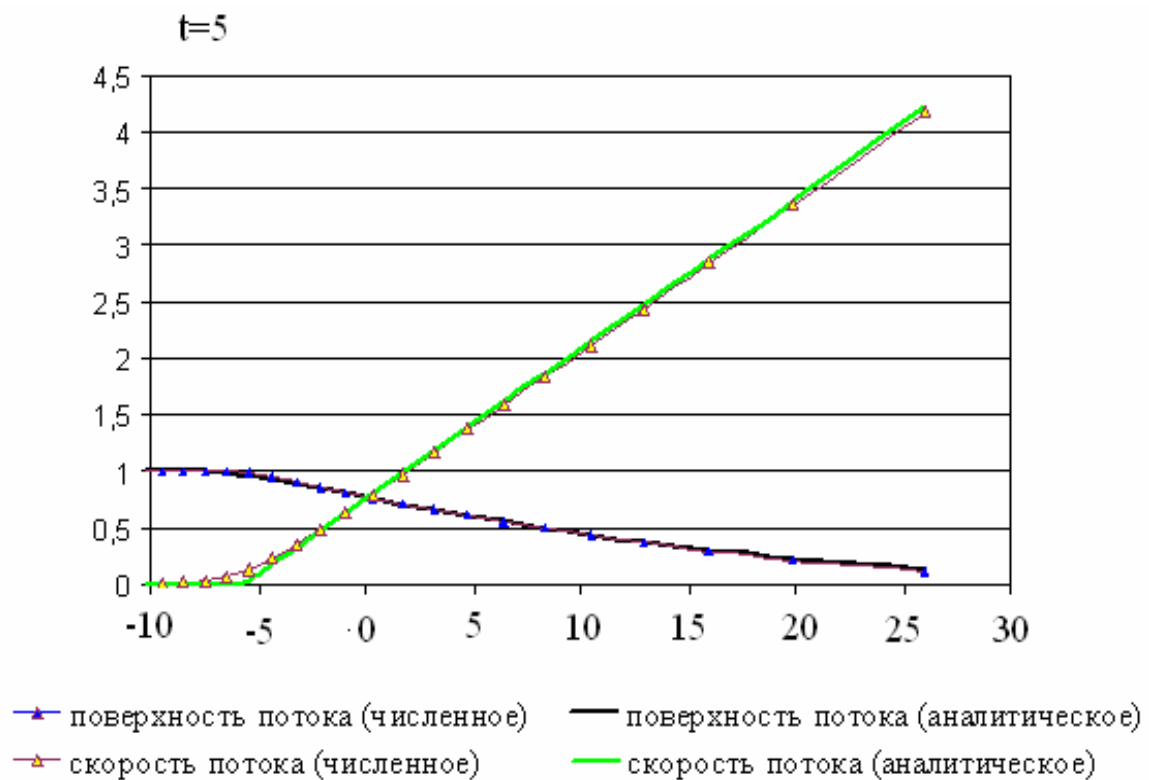


Рис. 2.14. Изменение высоты и скоростей потока, при $h = 1$, $l = 1$.

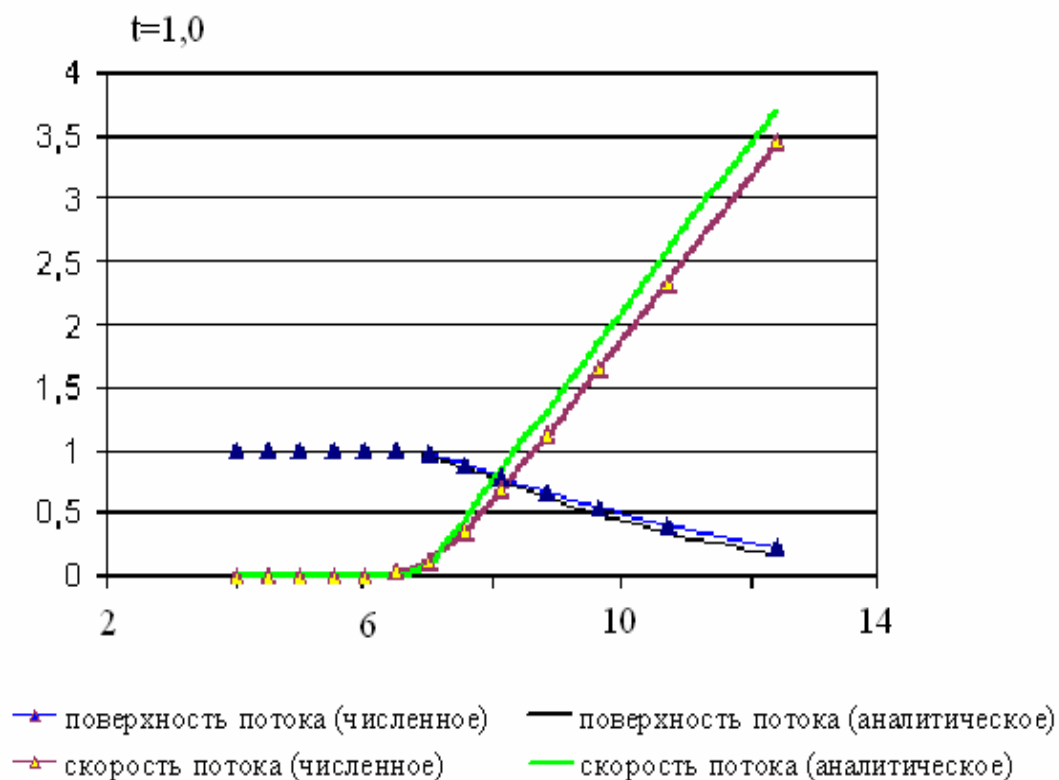


Рис. 2.15. Изменение высоты и скоростей потока, при $h = 1$, $l = 0,5$.

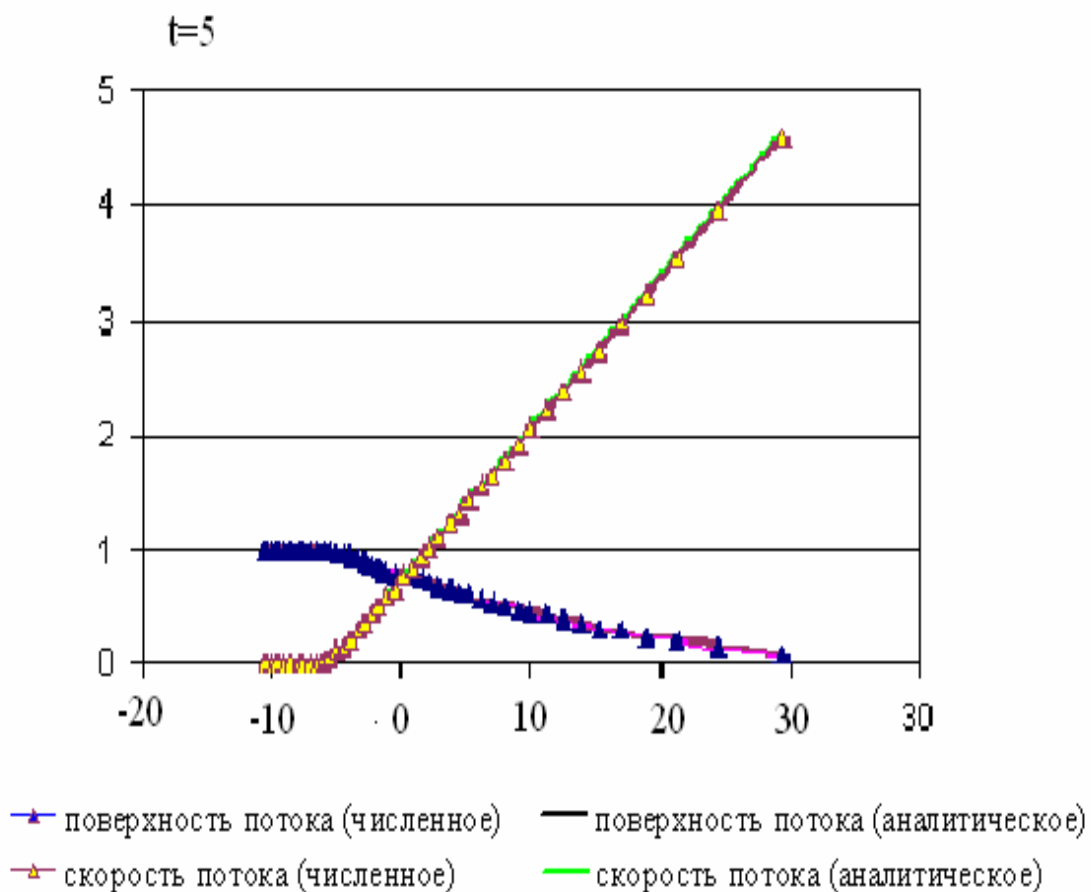


Рис. 2.16. Изменение высоты и скоростей потока, при $h = 1$, $l = 0,5$.

2. Движения жидкости (воды) при постоянном наклоне склона

(рис.2.17). При $x < 0$ вода имеет глубину h_0 , а при $x > 0$ – глубину $h_1=0$. Закон сохранения импульса и уравнения неразрывности для данной задачи имеет вид

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -g \frac{\partial h}{\partial x} \cos \alpha + g \sin \alpha + F \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (2.51)$$

Здесь $F = -\text{sgn}(u)k_z g \cos \alpha$

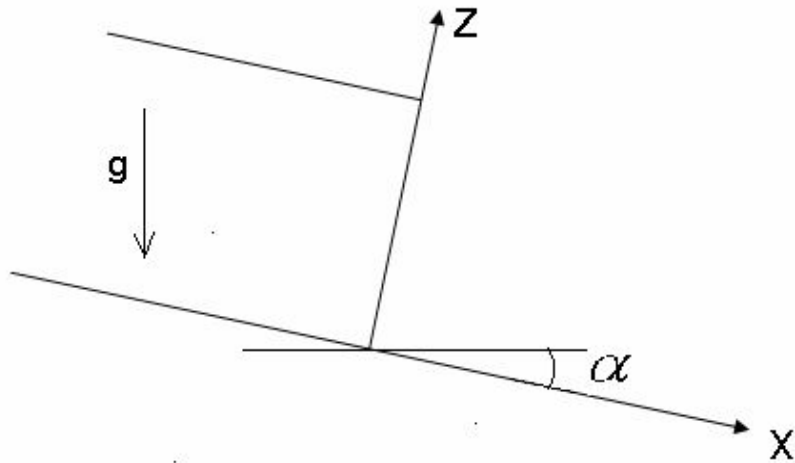


Рис.2.17. Движение жидкости при постоянном наклоне склона

Приняв следующие обозначение

$$\bar{\rho} = \rho h$$

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \rho g \cos \alpha h^2$$

закон сохранения импульса и уравнения неразрывности можем написать в виде

$$\begin{cases} \bar{\rho} \frac{du}{dt} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \bar{\rho} g \sin \alpha + \bar{\rho} F \\ \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} u)}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (2.52)$$

Приняв подстановку в виде (волновая скорость в жидкости)

$$c = \sqrt{\frac{d\bar{p}}{d\bar{\rho}}} = \sqrt{g \cos \alpha h} \quad (2.53)$$

и подставляя в (2.51) имеем

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + 2c \frac{\partial c}{\partial x} - g \sin \alpha - F = 0 \\ 2 \frac{\partial c}{\partial t} + 2u \frac{\partial c}{\partial x} + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \end{cases}$$

Складывая два уравнения последней системы уравнений, потом отнимая из первого второе, можно сразу записать характеристической форме

$$\begin{cases} \left[\frac{\partial}{\partial t} + (u + c) \frac{\partial}{\partial x} \right] (u + 2c - mt) = 0 \\ \left[\frac{\partial}{\partial t} + (u - c) \frac{\partial}{\partial x} \right] (u - 2c - mt) = 0 \end{cases} \quad (2.54)$$

Здесь использовано обозначение $m = g \sin \alpha + k_2 g \cos \alpha$.

В нашем случае характеристические уравнения имеют вид:

$$\text{вдоль линии } C_+ : \frac{dx}{dt} = u + c$$

$$\text{соотношение } k_+ = u + 2c - mt,$$

$$\text{вдоль линии } C_- : \frac{dx}{dt} = u - c$$

$$\text{соотношение } k_- = u - 2c - mt$$

т. е. будем иметь два семейства характеристик.

В данном случае мы видим, что двум семействам характеристик в плоскости (x, t) , определяемым уравнениями $\frac{dx}{dt} = u \pm c$, соответствует два

Инварианты Римана $k_{\pm} = u \pm 2c - mt$.

Для скорости потока жидкости имеем выражение

$$u = \frac{2}{3} \left(c_0 + \frac{x}{t} + mt \right) \quad (2.55)$$

С учетом (2.53) после несложных преобразований получим выражение для высоты потока жидкости в следующем виде

$$h(x,t) = \frac{1}{9g \cos \alpha} \left(2c_o - \frac{x}{t} + \frac{1}{2}mt \right)^2 \quad (2.56)$$

где $c_o = \sqrt{g \cos \alpha h_o}$.

Как видно из (2.55) функция $h(x,t)$ в точке $x=0$ терпит разрыв. При $t > 0$ этот разрыв мгновенно сглаживается, а поверхность части жидкости, находящейся в движении, принимает форму параболы. Точки касания параболы с оси x (т.е. дна) определяем из условия равенства нулю высоты потока ($h=0$), т.е. в точке $x_1 = 2c_o t + \frac{1}{2}mt^2$. Указанная парабола проходит от фронта волны до точки $x_2 = -c_o t + \frac{1}{2}mt^2$, после которой поверхность жидкости становится ровной ($c_o = \sqrt{g \cos \alpha h_o}$).

При $m=0$ и $\alpha=0$ из уравнений (2.55) и (2.56) получим решение задачи о разрушение плотины (2.50).

Если коэффициент трения приравнять к нулю, получим

$$u = \frac{2}{3} \left(c_o + \frac{x}{t} + g \sin \alpha t \right)$$

$$h(x,t) = \frac{1}{9g \cos \alpha} \left(2c_o - \frac{x}{t} + \frac{1}{2}g \sin \alpha t \right)^2$$

На рис. 2.18 представлен уровень жидкости h в зависимости от x для различных моментов времени при $\alpha=24,7^\circ$.

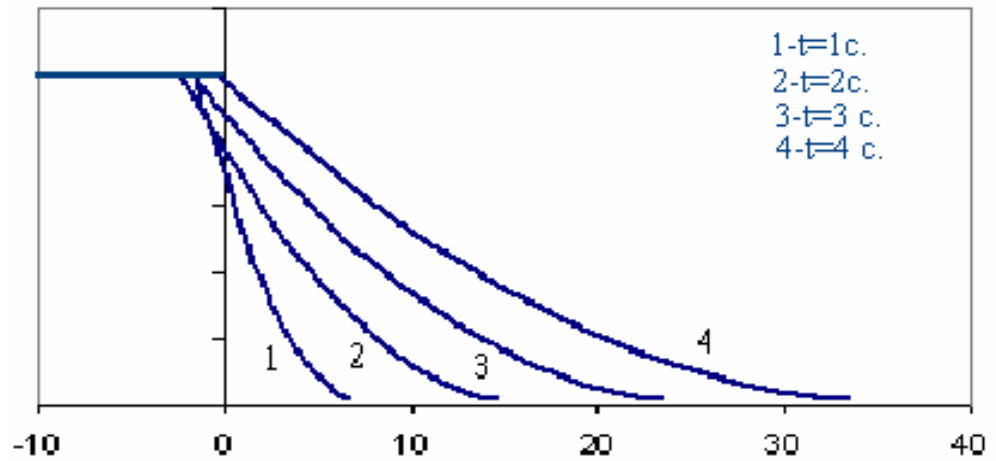


Рис. 2.18. Уровень воды для различных моментов времени при угле склона $\alpha=24,7^\circ$.

Эта задача решена предложенным методом. Результаты представлены на рис. 2.19.

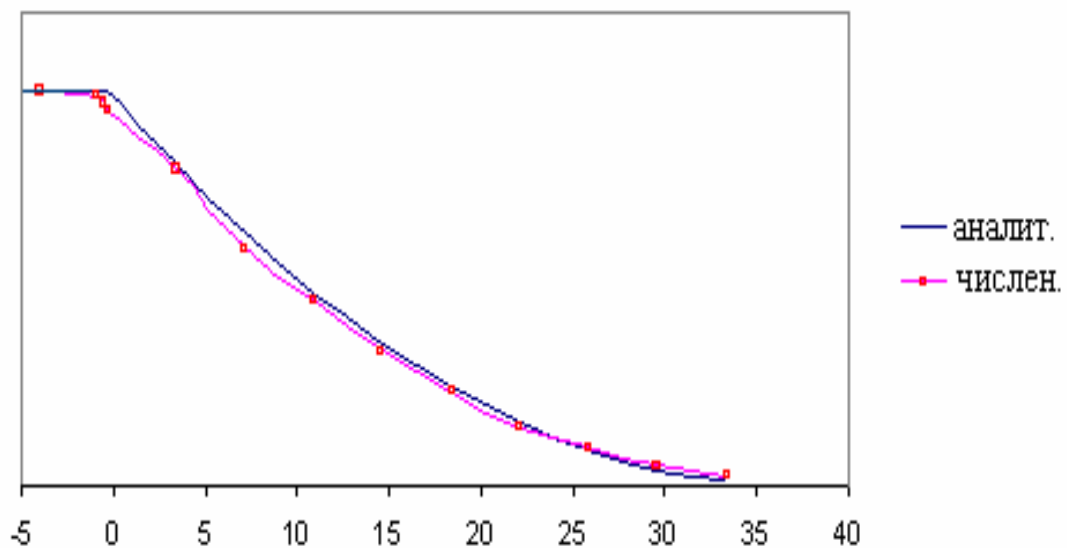


Рис. 2.19. Уровень воды для момента времени $t=4$ с. при угле склона $\alpha=24,7^\circ$

3. Движения грунтового - потока по склону с переменным углом наклона [4,39]. Приведем результаты расчета движения грунтового - потока по склону с переменным углом наклона (рис. 2.20). 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. 2.20 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.

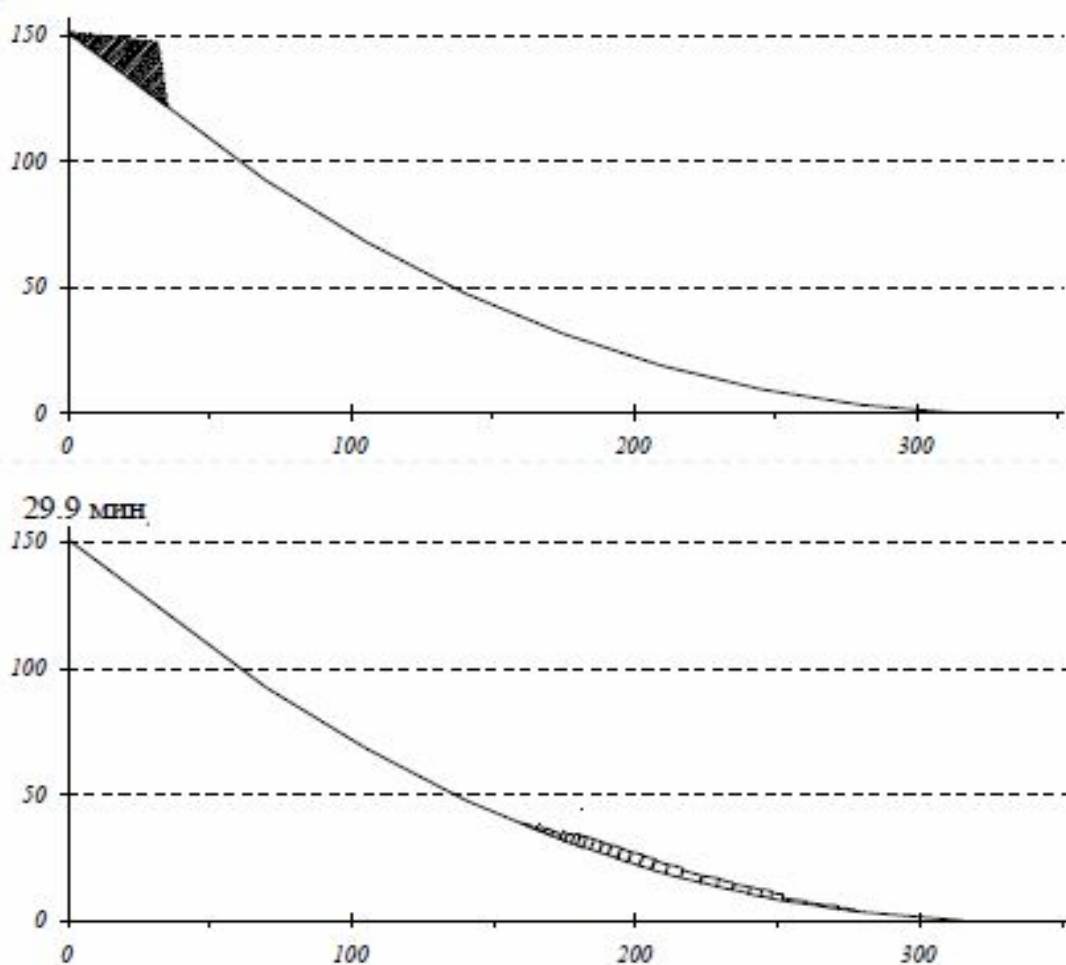


Рис.2.20. движения оползня-потока по склону с переменным углом наклона.

Основные результаты второй главы:

Основные результаты второй главы можно сформулировать следующим образом:

1. Получено метод частиц для описание движение грунтовой массы по склону переменного уклона под действием силы тяжести и кулоновского трения. Оно применено для анализа схода оползневой потока.
2. Разработана алгоритм обобщенного метода частиц к решению задач динамики вязкой несжимаемой жидкости;
3. Разработан и реализован вычислительный комплекс на основе метода частиц для моделирования движения оползневой процесса вязкой несжимаемой жидкости;
4. Проведено сравнение численных результатов, полученных методом частиц, с известными аналитическими решениями, и расчетами других авторов;
5. Силы инерции в частицах жидкости, которые уравнивают лишнее давление $p(q,t) - p_{cp}$ на соседних частицах – прямоугольниках вызывает изменение размеры частицы;
6. Предложенная квадратичная аппроксимация давления в частицах прямоугольниках в уравнении сохранения импульса корректно описывает динамику оползневой процесса.

ГЛАВА 3. СТРОИТЕЛЬСТВО ПЛОТИН ВЗРЫВООБВАЛЬНЫМ СПОСОБОМ

3.1. Действия зарядов взрывчатых веществ (ВВ) на склонах.

В последние годы в гидротехническом и дорожном строительстве для перемещения больших объемов горных масс широкое применение находит энергия взрывчатых веществ (ВВ).

Как правило, гидротехнические объекты строятся в каньонах рек и на склонах горных хребтов, имеющих различную крутизну. Поэтому, изучение закономерностей действия взрыва зарядов на склонах с изменяющейся крутизной представляет несомненный теоретический и практический интерес. К настоящему времени эти закономерности изучены недостаточно по сравнению с действием взрыва зарядов на горизонтальной поверхности,

Исследование показывает, что с увеличением крутизны склона вес заряда взрывчатого вещества (ВВ) уменьшается. Сущность этой поправки заключается в том, что с увеличением крутизны склона уменьшается затраты энергии на подъем порода в поле силы тяжести. Если при взрыве на горизонтальной поверхности для обеспечения выноса породы за пределы воронки выброса требовались значительные начальные скорости и высоты подъема, то при взрывании на склонах (крутизной более 40°) бывает достаточным подъем грунта на высоту немногим более одного линия наименьшего сопротивления (л.н.с.) (W).

Для выявления особенностей действия, зарядов на склонах были поставлены специальные опытные работы по моделированию действия зарядов в лабораторных условиях [48]. Задачи этих опытов заключались в сопоставления поведения зарядов при взрывании на горизонтальной поверхности и на склонах различной крутизны.

Исследования [48] показали, что при увеличении угла наклона от 20 до 70° радиус воронки вверх по склону увеличивается в 1,5 раза. Возрастание объема сброса за счет обрушения пород под влиянием силы тяжести подтверждено и промышленными взрывами. При взрыве в Байпазе, где крутизна склона превышала 70°, объем обрушения составил до 50% от общего объема сброса, а в Бурлыкском взрыве при крутизне около 45°, объем обрушения составил 35% от общего объема сброса.

В пределах рассматриваемых весов зарядов при постоянной крутизне склона с увеличением величины заряда происходит незначительное увеличение радиуса воронки вверх по склону. Однако это увеличение более заметно для сосредоточенного заряда по сравнению с удлиненным (УГЗ).

Кроме данных лабораторных опытов, были проанализированы такие промышленные взрывы, как Медео, Байпазы, Бурлыкские и другие [48, 51]. В результате обобщения всех этих данных, а также из опыта изучения естественных завальных плотин, где потенциальная энергия силы тяжести горных пород рассматривалась для больших масштабов [51], можно сделать следующие предварительные выводы: в разрушении и перемещении горных пород на склоне принимают участие как энергия ВВ, так и энергия поля силы тяжести горных пород. Их долевое участие зависит (при прочих равных условиях) от масштаба явления. Чем меньше масштаб, тем больше роль энергии ВВ. С увеличением масштаба растет роль силы тяжести. Необходимо подчеркнуть, что при взрывании на склоне основные результаты взрыва однозначно не определяются только глубиной заложения или массой заряда. Результаты зависят также от геометрических параметров (крутизна и высота) и геолого-тектонических условий. В наших экспериментах геолого-тектонические условия определяются только связностью грунта. Это положение можно проиллюстрировать на следующем примере. Например, при взрывании в Медео, несмотря на большую массу заряда ≈ 6 тыс. т, благодаря незначительной высоте и крутизне склона наблюдался недобор

проектного объема плотины. Наоборот, при взрыве в Байпазе даже при меньших массах заряда $\approx 2,0$ тыс.т, благодаря значительной крутизне и высоте, объем сброса был в 1,5 раза больше проектного.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили выявить основные качественные особенности действия зарядов на склонах по сравнению с горизонтальной поверхностью. Эти особенности предопределяются геометрией склона, благодаря которому изменяется роль силы тяжести как в развитии к подъему купола взрыва, так в обрушении консоли над воронкой.

Размеры воронки выброса зависят от энергии ВВ, глубины заложения заряда, типа горной породы (грунта), рельефа дневной поверхности и других факторов [52]. Многие исследователи изучали вопрос о форме воронок. В результате чего получены формулы расчета, основанные на допущении, что видимая глубина H_B зависит от линии наименьшего сопротивления л.н.с. (W) и показателя действия взрыва n . Установлено также [53], что крутизна склона оказывает существенное влияние на параметры воронки взрыва.

В работе [52] представлены результаты экспериментов, проведенных для выявления влияния формы заряда и крутизны склона на результат взрыва. Взрывы проводились в песке на склонах различной крутизны: пологих ($\alpha=20^\circ$), среднекрутых ($\alpha\leq 30^\circ$), крутых ($\alpha = 45^\circ$), очень крутых ($\alpha\leq 70^\circ$). Влажность песка изменялась от 2 до 6% что не оказывало существенного влияния на состояние модели.

При взрывах фиксировались параметры воронки и кинематические параметры. Полученные в результате экспериментов зависимости параметров H_B , B , n , $V(t)$, от W и Q . позволили сравнить действие сосредоточенных и УГЗ на горизонтальной обнаженной поверхности:

H_B - видимая глубина воронки, см;

B - раствор воронки по верху, см;

$V(t)$ - объем воронки выброса, см^3 ;

U - скорость выброса, м/с ;

W - линия наименьшего сопротивления, см ;

Q - масса заряда, г .

На рис.3.1 приведены зависимости $n_{\text{ср}}(W)$ и $V_{\text{в}}(W)$ для взрыва зарядов разной формы на горизонтальной поверхности. Из рисунка видно, что объем воронки выброса удлиненного горизонтального заряда больше, чем для сосредоточенных, и с увеличением л.н.с. (W) возрастает значительно быстрее, чем для сосредоточенного. Видимая глубина воронки сосредоточенных зарядов $H_{\text{в}}$ на 10-15% больше $H_{\text{в}}$ УГЗ того же веса.

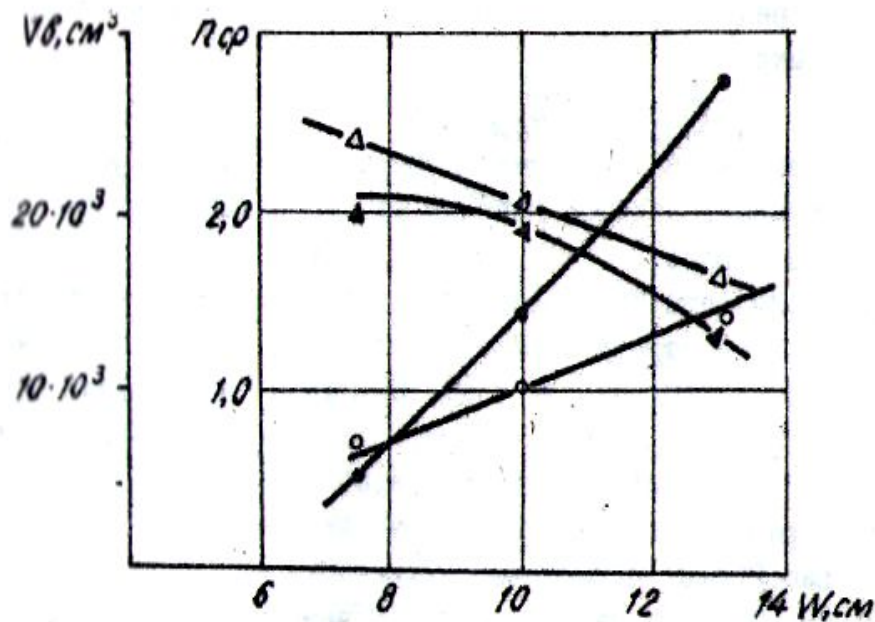


Рис.3.1. Изменение объема выброса и показателя действия взрыва с глубиной заложения заряда при взрыве зарядов на горизонтали. -о- $V(W)$ сосред.; -•- $V(W)$ УГЗ; -Δ- $n(W)$ сосред.; -▲- $n(W)$ УГЗ.

Исследованиями [53, 54] установлено, что при взрыве сосредоточенных зарядов с увеличением крутизны склона радиус взрыва в нагорную сторону R_+ в 1,2-1,8 раза больше, чем R на горизонтали. При взрыве сосредоточенных зарядов на склоне изменение угла склона оказывает большее влияние на

параметры воронки, чем для удлиненного заряда. Для получения более четкой зависимости параметров воронки от угла склона при взрыве зарядов разной формы проведены эксперименты на склонах с углами $\alpha = 20, 30, 45$ и 70° [51].

Расчет массы заряда проводили по формуле М.М. Борескова с учетом поправки на косогор, введенного профессором Г.И. Покровским [57]

$$Q = KW^3(0,4 + 0,6n^3) \cos \alpha \quad (3.1)$$

где K - удельный расход ВВ в данном грунте;

W - линия наименьшего сопротивления;

n - показатель действия взрыва;

α - угол наклона склона к горизонту.

Анализ формулы (3.1) показывает, что с увеличением крутизны склона вес заряда ВВ уменьшается. Сущность этой поправки заключается в том, что с увеличением крутизны склона уменьшается затраты энергии на подъем порода в поле силы тяжести. Если при взрыве на горизонтальной поверхности для обеспечения выноса порода за пределы воронки выброса требовались значительные начальные скорости и высоты подъема, то при взрывании на склонах (крутизной более 40°) бывает достаточным подъем грунта на высоту немногим более одного W .

Для выявления особенностей действия, зарядов на склонах были поставлены специальные опытные работы по моделированию действия зарядов в лабораторных условиях [57]. Задачи этих опытов заключались в сопоставления поведения зарядов при взрывании на горизонтальной поверхности и на склонах различной крутизны.

Увеличением угла склона наблюдается уменьшение максимальных скоростей выброса для всех изученных масс заряда. Это, вероятно, связано

как с вводимой при расчете заряда поправкой на $\cos\alpha$, так и с изменением роли силы тяжести при взрывах на склонах разной крутизны.

Из опыта (рис.3.2) получена что, значения показателя действия взрыва с изменением глубины заложения заряда $n(W)$ для сосредоточенных зарядов убывают для всех рассмотренных углов склона ($\alpha = 20, 30, 45, 70^\circ$).

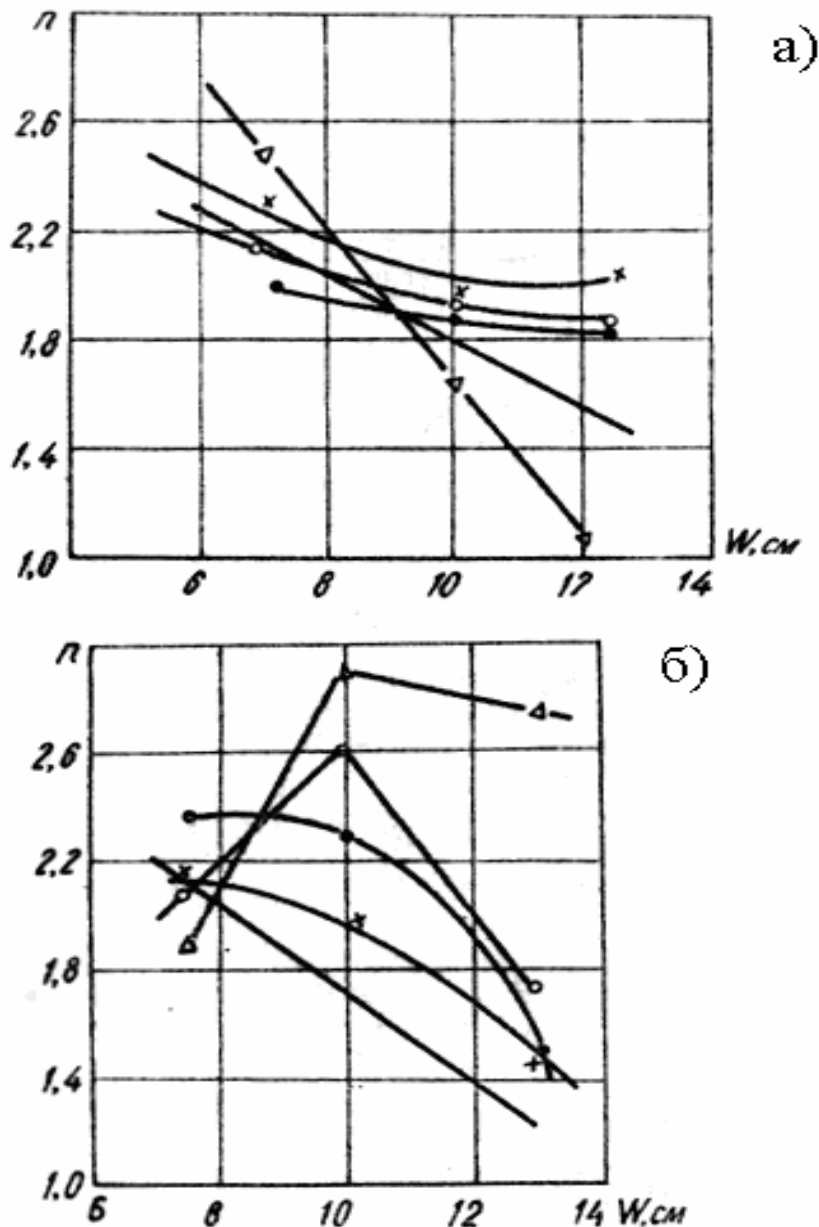


Рис.3.2. Изменение показателя действия взрыва от глубины заложения заряда при взрывах на склонах разной крутизны (по поперечным сечением):

а) сосредоточенные заряды: — $\alpha=0$; -●- $=20$; -x- $=30$; -o- $=45$; -Δ- $=70$

б) УГЗ [52].

Для УГЗ зависимость $n(W)$ при разных углах склона меняется с изменением угла: при $\alpha = 0^\circ$ $n(W)$ убывает по линейной зависимости, с увеличением $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ происходит постепенное увеличение n до максимума с увеличением W , затем снижение. Строгой функциональной зависимости $n(W)$ при разных углах склона выявить не удастся, так как для разных углов они колеблются.

При взрыве сосредоточенных зарядов на склонах (с меняющейся крутизной) образующаяся воронка ассиметрична, нижняя часть воронки наиболее глубокая, выброс грунта происходит вниз по склону и равномерно в стороны. Ассиметричность воронки с увеличением угла склона и массы заряда увеличивается.

Пример зависимости $H_b/W(\alpha)$ при взрыве сосредоточенных и УГЗ массой $Q = 4,0$ гр, $W = 13$ см представлен на рис.3.3.

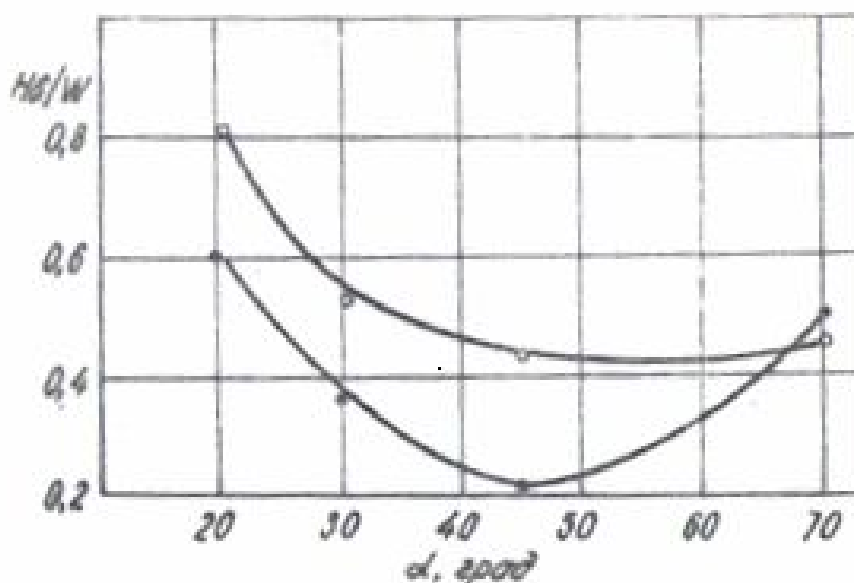


Рис.3.3. Зависимость относительной глубины воронки взрыва зарядов разной формы от крутизны склона: -o- сосредоточенные; -●- УГЗ [52].

Общим в этих зависимостях являются уменьшение значений H_b/W при увеличении угла склона от 20 до 45° , достижения минимального значения при $\alpha < 45^\circ$ и затем увеличение значений H_b/W с увеличением угла α до 70° .

Для УГЗ эти зависимости близки к параболической с вершиной на линии параллельной оси ординат, проходящей через точку $\alpha = 45^\circ$.

Для сравнения действия сосредоточенных и УГЗ на склонах разной крутизны рассмотрим зависимости $R_+/R_-(\alpha)$ (рис.3.3).

Для сосредоточенных зарядов зависимость $R_+/R_-(\alpha)$ выражается в виде показательной функции $R_+/R_- = A\alpha^b + c$, причем $C \approx 1,2-1,3$ (рис.3. 4); в промежутках $20^\circ \leq \alpha < 45^\circ$ значения ординаты кривой $R_+/R_-(\alpha)$ практически остаются постоянными и только при $\alpha \geq 45^\circ$ увеличиваются в 3 раза для $W = 7,5$ см; 10 см и в 6 раз - при $W=13$ см, т.е. с увеличением массы заряда и угла откоса радиус в подгорную. Для УГЗ эта зависимость $R_+/R_-(\alpha)$ практически постоянно и мало зависит от угла откоса и массы заряда.

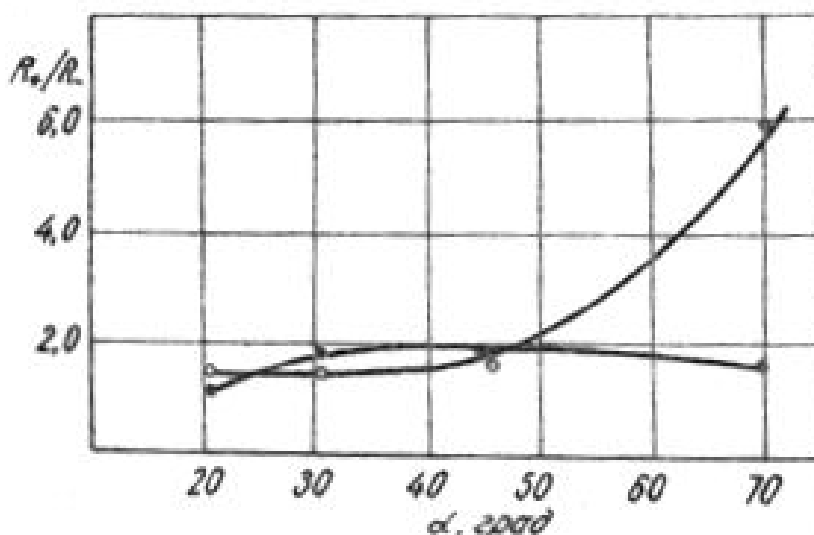


Рис.3.4. Изменение отношения радиуса воронки в нагорную сторону R_+ к радиусу воронки в подгорную сторону R_- в зависимости от крутизны склона [52].

При взрыве сосредоточенных зарядов на склонах (с меняющейся крутизной) образующаяся воронка ассиметрична, нижняя часть воронки наиболее глубокая, выброс грунта происходит вниз по склону и равномерно в стороны. Ассиметричность воронки с увеличением угла склона и массы заряда увеличивается.

При взрыве УГЗ на склонах с увеличивающейся крутизной воронка несколько вытянута вдоль склона, верхняя часть ее засыпана, выброс в основном перпендикулярен линии заряда, в торце заряда выброса нет.

Начиная с угла $\alpha=30^\circ$ в верхней части склона над воронкой образуются концентрические (откольные) трещины, количество их с увеличением массы заряда возрастает, расстояния между ними зависят от угла склона.

С ростом массы заряда обрушения в верхней части склона увеличиваются, закольные трещины становятся больше по размерам и количеству. После проведения измерений воронки, радиуса обрушения, навала воронка очищалась от грунта, и определялись плоскости и углы скольжения. Они составили в среднем $\beta \approx 56-64^\circ$. Радиус обрушения с увеличением угла ($\alpha = 45^\circ, 70^\circ$) возрастает для обеих форм заряда, причем для сосредоточенных зарядов кривые $R_{обр}(W)$ лежат выше, чем для УГЗ (см. рис.3.5).

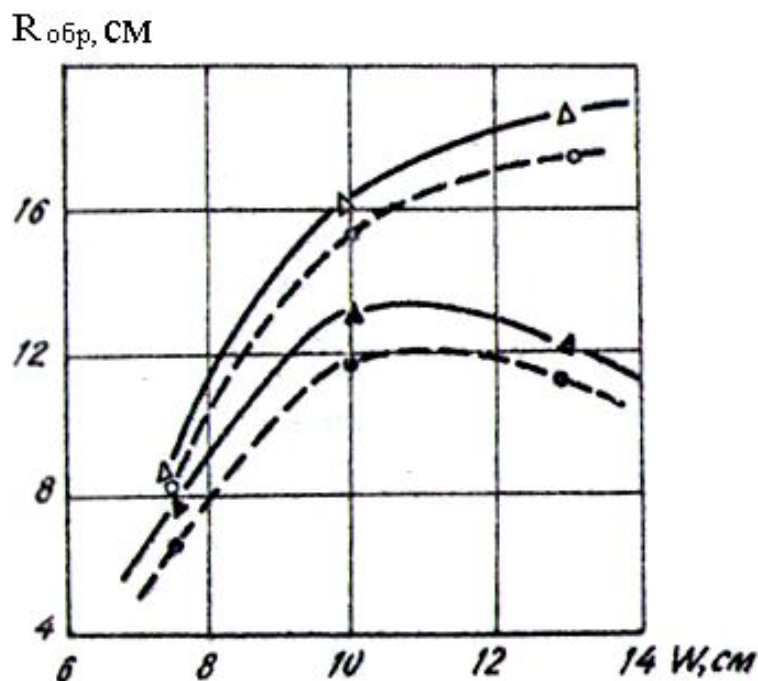


Рис.3.5. Зависимость радиуса обрушения от глубины заложения заряда при взрыве зарядов разной формы на склонах. -о- $\alpha = 45^\circ$; -Δ- $\alpha = 70^\circ$; -●- $\alpha = 45^\circ$; -▲- $\alpha = 70^\circ$ [52].

При взрыве УГЗ прослеживается асимметрия в нарастании скорости в зависимости от направления детонации заряда. Со стороны начала детонации скорость нарастает быстрее (достигает своего максимума). Эта разница наблюдается и в формировании фронта детонационной и взрывной волн. Вокруг удлиненного заряда образуется грушевидный фронт с большой полуосью со стороны начала детонации заряда.

3.2. Исследование движение грунтового – потока на склонах при строительстве плотины взрывообвальным способом

Взрыв нижнего заряда обеспечивает разрушение и взброс нижней подпорной стенки предполагаемой призмы обрушения, создав условия для лавинообразного движения для верхнего объема горной массы (см. рис.3.6). Таким образом, взрыв этого заряда создает условия для истечения и движения разрыхленного верхним зарядом горной массы. Верхний заряд создает условия только для потери устойчивого равновесия, и образование поверхности скольжения, а также разрыхляет верхнюю призму обрушения.

При этом главную роль играют два фактора. Первый - отсутствие подборки и второй реализации потенциальной энергии силы тяжести обрушаемой горной массы склона. Эта энергия тем больше, чем больше объем обрушаемой массы. Это было видно из примера Кара-Суйского завала. Именно эта же энергия силы тяжести горной массы в процессе лавинообразного движения по склону производит работу по дроблению (путем соударения и т.д.), перемещению и упаковке обрушенной горной массы в тело завала (плотины). Метод позволил сократить удельный расход ВВ. Он составил $0,9 \text{ кг/м}^3$ на весь объем сброса и обрушения. Чем больше масштабы обрушения, тем эффективнее данный метод. Взрывообвальная плотина создается на каньонах горных рек с помощью взрыва и обрушения.

Объемы горных пород от взрыва значительно меньше, чем объемы обрушения с помощью энергии силы тяжести горных масс. Соотношения объемов от взрыва и от обрушения зависит от ряда факторов, таких как тектоническая подготовленности массива (наличие плоскость скольжения, тектонических трещин, ослабленных зон) и масштабы взрыва. Исходя из изложенного выбор створа плотин с учетом выше перечисленных факторов резко увеличивает эффективность применения данного метода. Задачей дальнейших исследований является оптимизация параметров взрывообвальной плотины с учетом природных и масштабных факторов обеспечивающих безопасность и эффективности нового метода [34]. Практика показывает, что масса массива обрушения зависит от глубины h и мощности заряда Q .

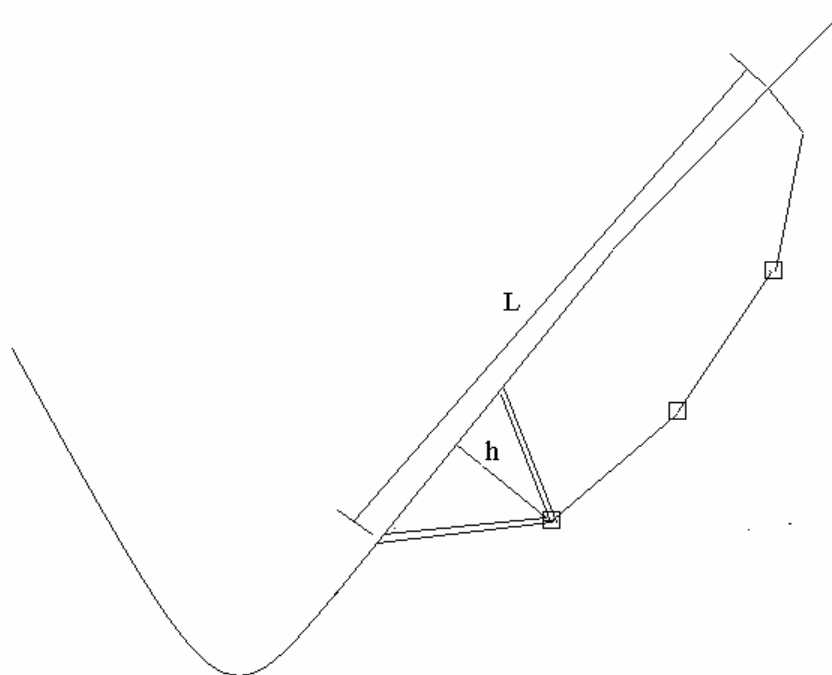


Рис.3.6. Геометрия призмы обрушения. h – глубина заложения заряда; L - длина призмы обрушения.

Задав объем плотины (считав площадь поперечного сечения плотины постоянной) можно построить зависимость длины призмы обрушения от глубины заложения заряда. В дальнейшем процесс взрыва мы не будем

рассматривать. Предварительно задав параметры взрыва, т.е. размеры воронки взрыва будем определять длину призмы обрушения (см. рис. 3.7).

Закон сохранения импульса зависит от рельефа местности. Эти параметры содержатся на правой части уравнения. Это означает изменение рельефа местности влияет как меняется величина внешних сил.

Теперь рассмотрим следующий случай. Необходимо найти оптимальные параметры предполагаемой призмы обрушения (толщину и длину) задав место расположения заряда. Правый борт каньона имеет угол наклона в пределах 50 градусов, а левый борт от 40 до 50 градусов. По проекту глубина заложения зарядов до 260 метров.

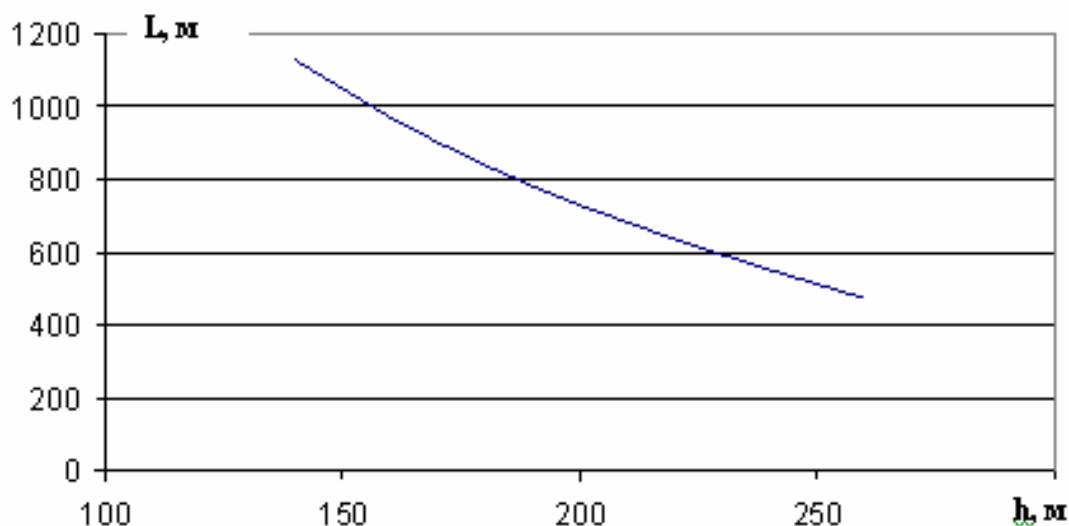


Рис.3.7. Зависимость длины призмы обрушения (L) от глубины заложения заряда (h).

Нами рассмотрен случай, когда заряд установлен на глубине 200 метров (рис.3.8). Высота расположения заряда ниже проектной высота плотины. Расчеты показали что. При таком расположении заряда плотина после обрушения не набирает проектную высоту.

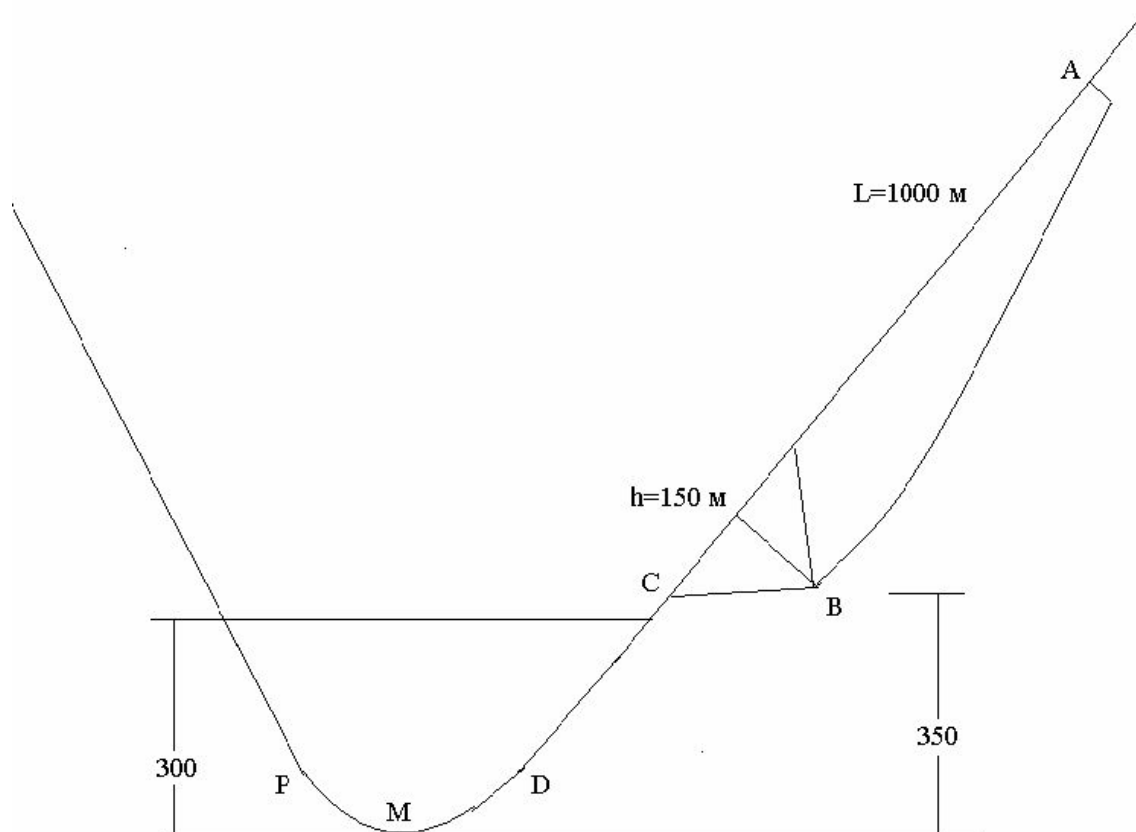


Рис.3.8. Предложенная схема обрушения массы.

Для определения оптимальную высоту и скорости потока нами было проведена численный эксперимент. При этом глубина заложения заряда, длина возможной призмы обрушения были объектами исследования.

В результате экспериментов нами установлено, что если глубина заложения равна на 150 метрам и длина призмы обрушения 1000 метров скорость потока будет достаточным чтобы, обрушаемая масса набрал необходимую высоту [42].

После взрывов обрушаемая масса распространяется достаточно быстро. В первые секунды расчета резко увеличиваются скорости частиц на переднем фронте. С течением времени увеличивается «хвост» потока: уменьшаются высоты и увеличивается длина потока. На рис. 3.9. представлен график изменение скорости потока по длине, также ее высота.

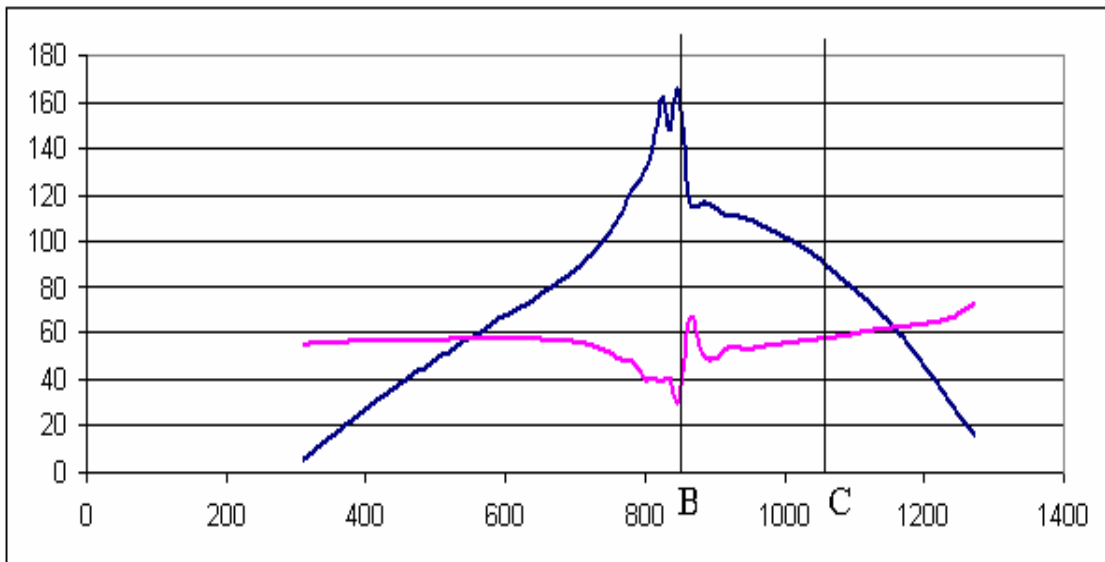


Рис.3.9. Толщина потока(h), и скорости частиц (u) (значение скоростей умножена на 10) при $t = 1$ минута

На переднем фронте скорость составляет около 7 м/с. На участке АВ (на поверхности взрыва) угол наклона малая поэтому скорость потока падает, т. е. произойдет торможение потока. Из чего высота потока перед этим участком наибольшая. Далее скорость потока увеличивается и высота уменьшается. На рис.3.10 и 3.11 представлены характеристики движения потока. Коэффициент трения K_s равна 0.4.

Дойдя до противоположенного борта грунтовой поток затормаживается, теряет скорость (участок DP) и начинается его сползание по склону вдоль долины. Если скорость достаточно большая 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).

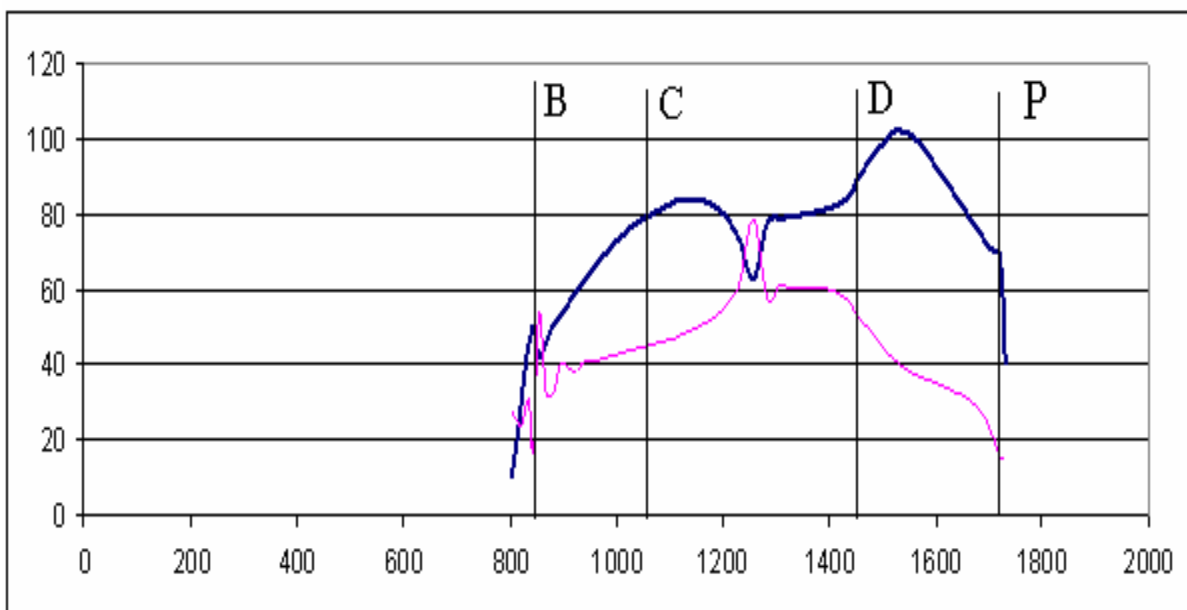


Рис.3.10. Толщина потока (h), и скорости частиц (u) (значение скоростей умножена на 10) при $t = 3$ минута

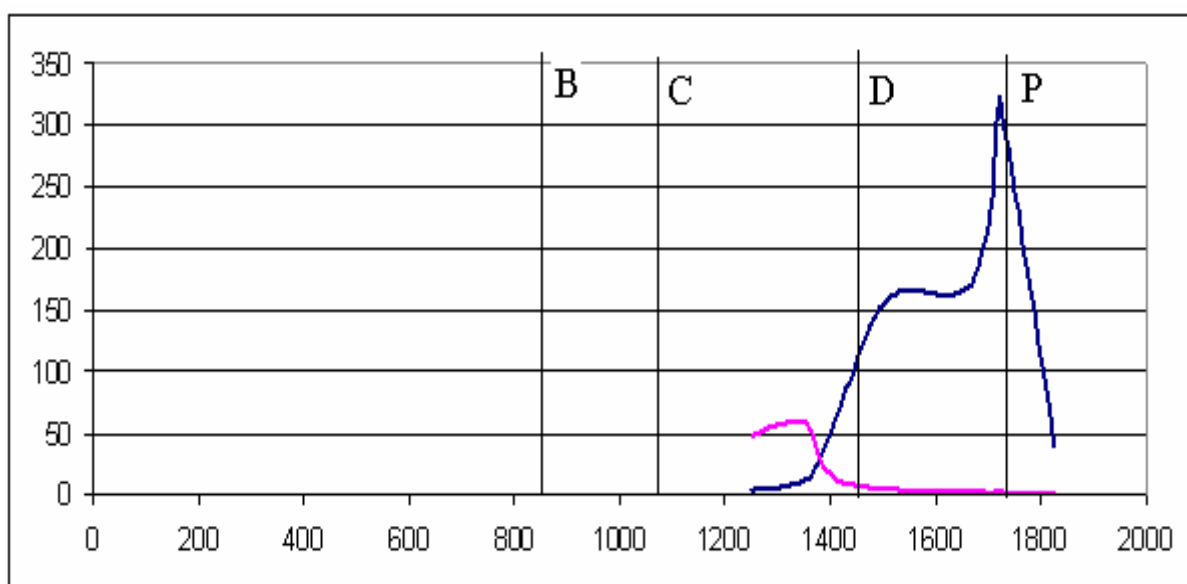


Рис.3.11. Толщина потока (h), и скорости частиц (u) (значение скоростей умножена на 10) при $t = 5$ минута.

На рис.3.12 видно, что обрушаемая масса достаточно хорошо набрал необходимую высоту, и почти совпадает проектной высотой плотины. Все эти результаты подтверждает необходимость проведения моделирования для выбора оптимальных параметров обрушаемой массы.

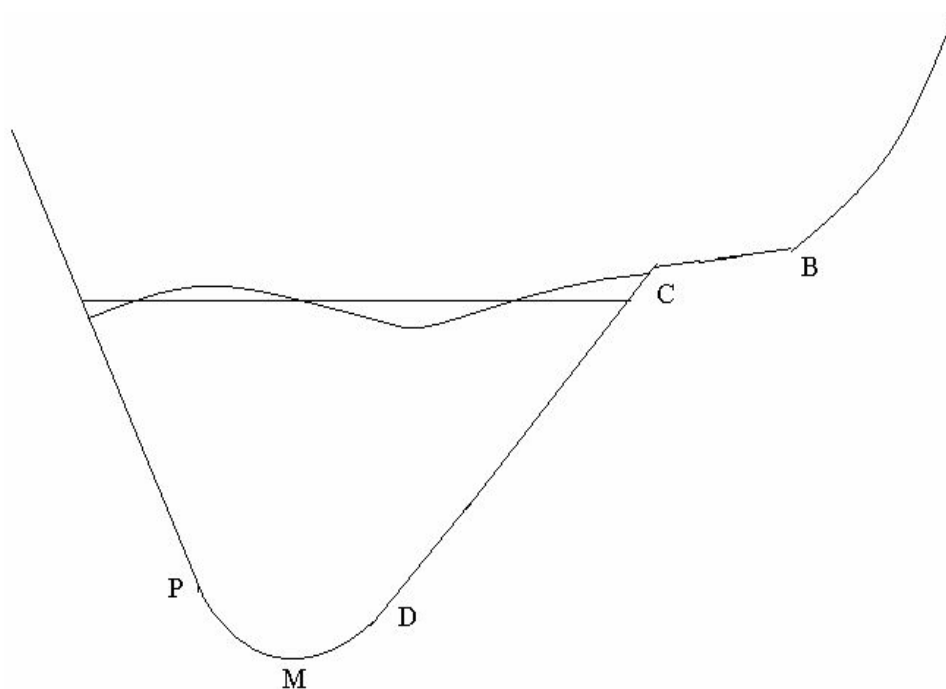


Рис.3.12. Плотина после взрыва.

Теперь исследуем влияние коэффициента трения на характер движения грунтового – потока. На рис. 3.13 показано изменение мощности потока и скоростей частицы при $k_c = 0$ и $0,3$ через $t=60$ сек после начало обрушения. Из видно, что скорость движения на фронте потока при $k_c = 0$ составляет $6,61$ м/с, а при коэффициенте трения $0,3$ -составляет $5,17$ м/с

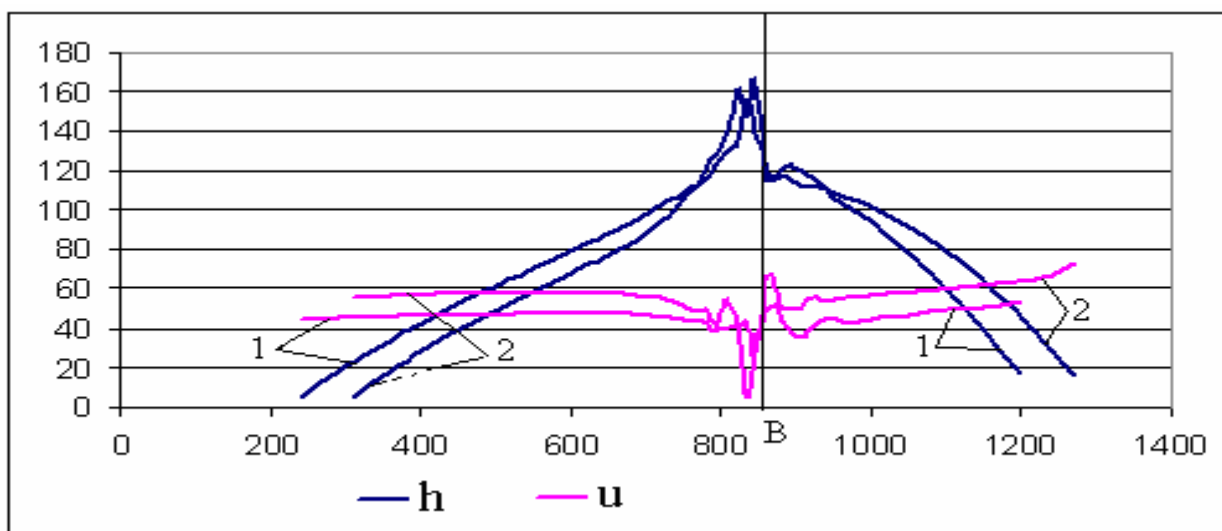


Рис.3.13.Изменение мощностей (h) и скоростей (u) потока при разных коэффициентах трения (1- $k_c=0$; 2- $k_c =0,3$).

Далее рассматривается характер движения грунтового - потока при разных значениях коэффициента трения ($k_c=0,0,1; 0,2; 0,3$). Для исследования влияние коэффициента трения на динамику эволюции данного процесса были построены графики изменение скоростей и мощностей потока (рис.3.14 и 3.15).

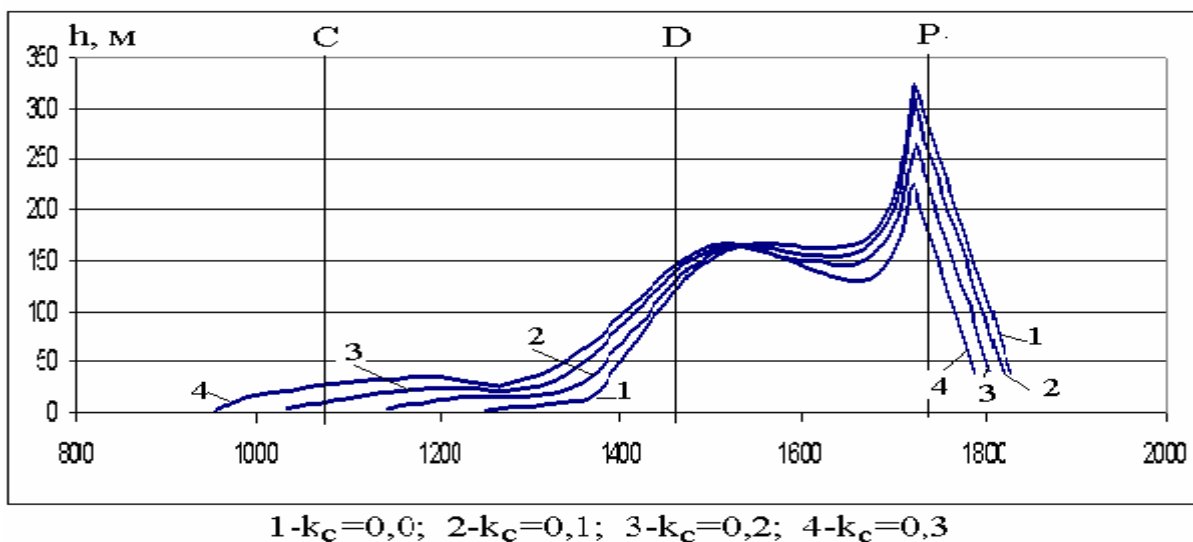


Рис. 3.14. Изменение мощностей (h) потока при разных коэффициентах трения, $t=280$ сек.

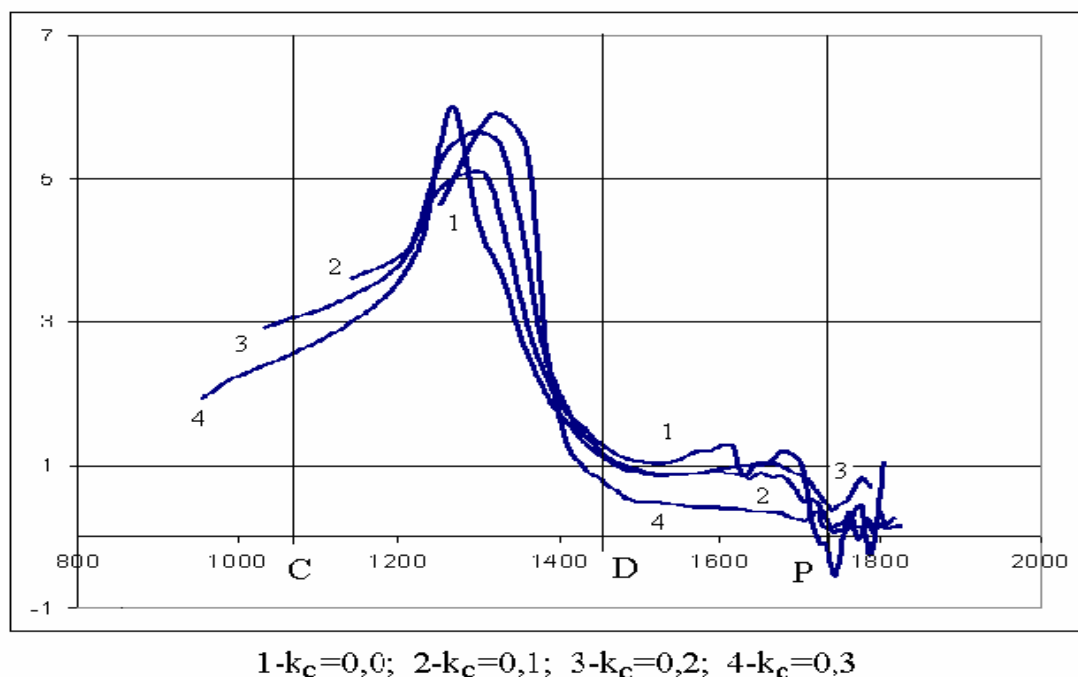


Рис. 3.15. Изменение скоростей потока (u) при разных коэффициентах трения, $t=280$ сек.

Из рисунков видно, что коэффициент трения влияет на скорость и высоту потока. С увеличением коэффициента трения скорость уменьшается, также время до остановки потока увеличивается. На рис.3.16 построена изменение скорости и высоту переднего фронта. Из рисунка видно, что на участке CD где поверхность ровная, частицы грунтового потока ускоряется, за счет давление хвостовой части, после этого передняя часть потока затормозит. На этом участке скорости частицы потока наибольшее, чем на других участках. Как только передний фронт потока перейдет на противоположную сторону склона скорость потока начинает уменьшатся. Она будет уменьшаться за счет действие объемного веса грунта.

При этом высота увеличивается и через некоторое время передний фронт остановится.

На рис. 3.17 представлены характеристики движения центра масс грунтового - потока. Грунтовой - поток распространяется достаточно быстро. В первые секунды расчета резко увеличиваются скорость центра грунтового - потока. С течением времени увеличивается скорость грунтового - потока: уменьшаются высоты, увеличивается длина каждой частицы и потока как общего целого. К 73 секунде расчета центр массы потока достигает к точке (B) после перехода точки, т.е. где направления поверхности резко меняется, скорость центра массы резко возрастает. При этом высота центра резко уменьшается. Это видно из рис. 3.17. Через 5,1 минут центр массы грунтового потока достигает глубину каньона и останавливается.

Хотелось отметить новизна данной работы состоит в развитии и применении варианта метода частиц, к моделированию движения потоков различной природы по склоновым поверхностям.

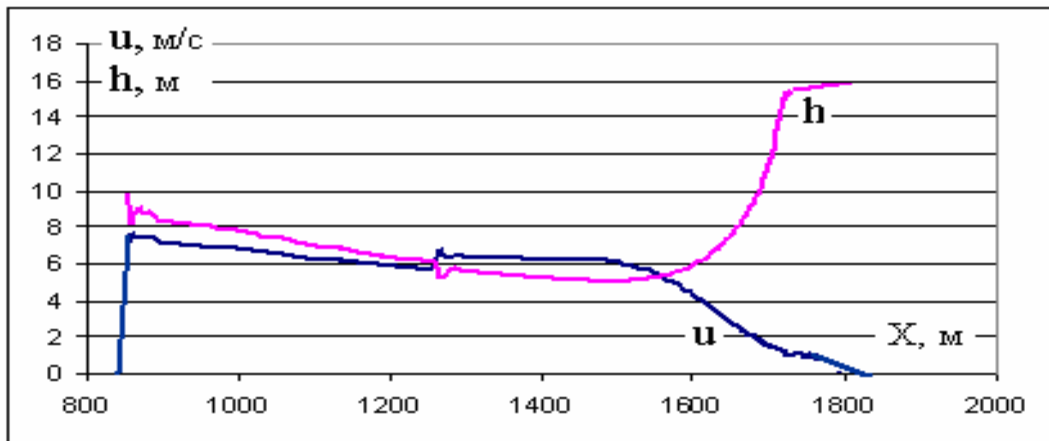
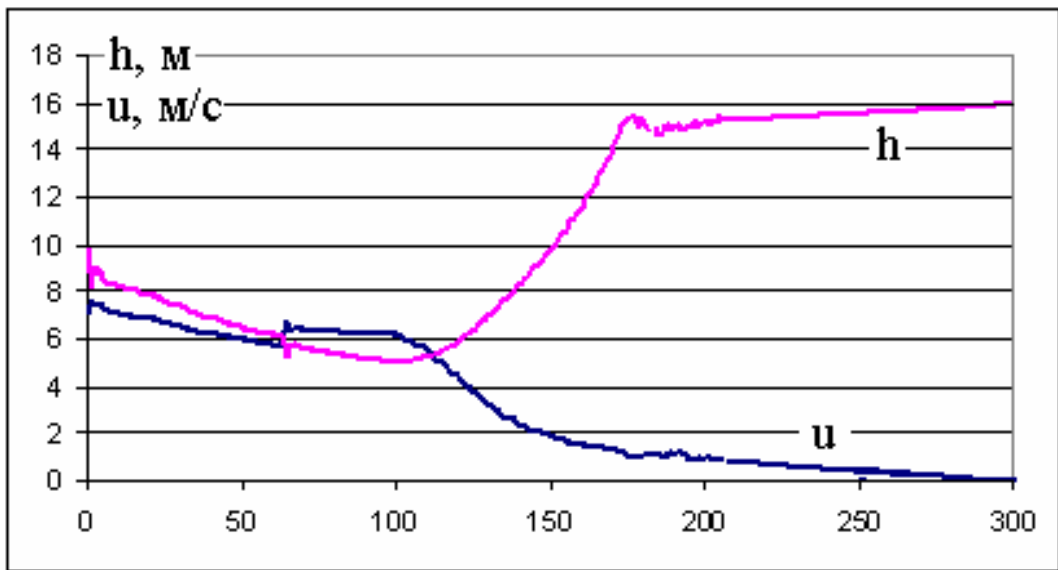
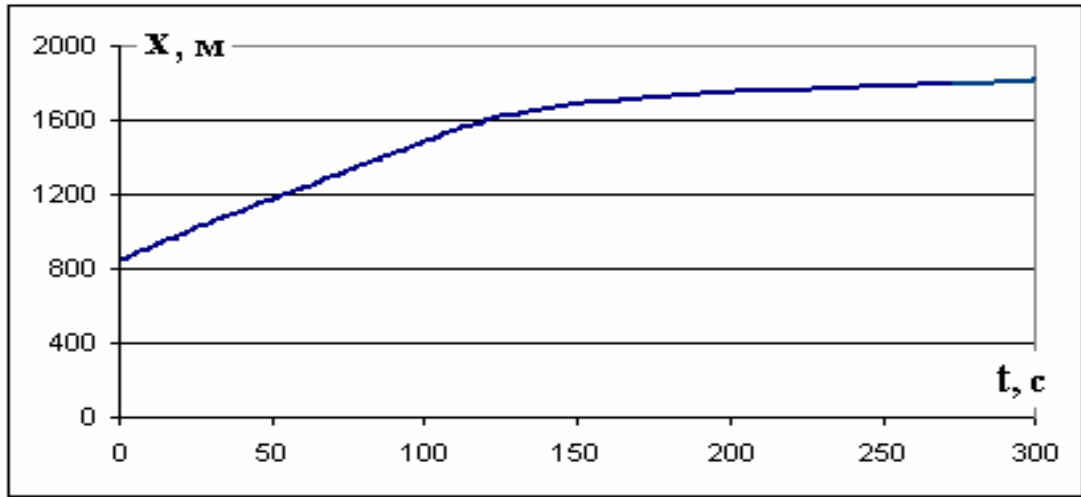


Рис.3.16. Изменение скоростей (u) и высоты (h) переднего фронта грунтового – потока.

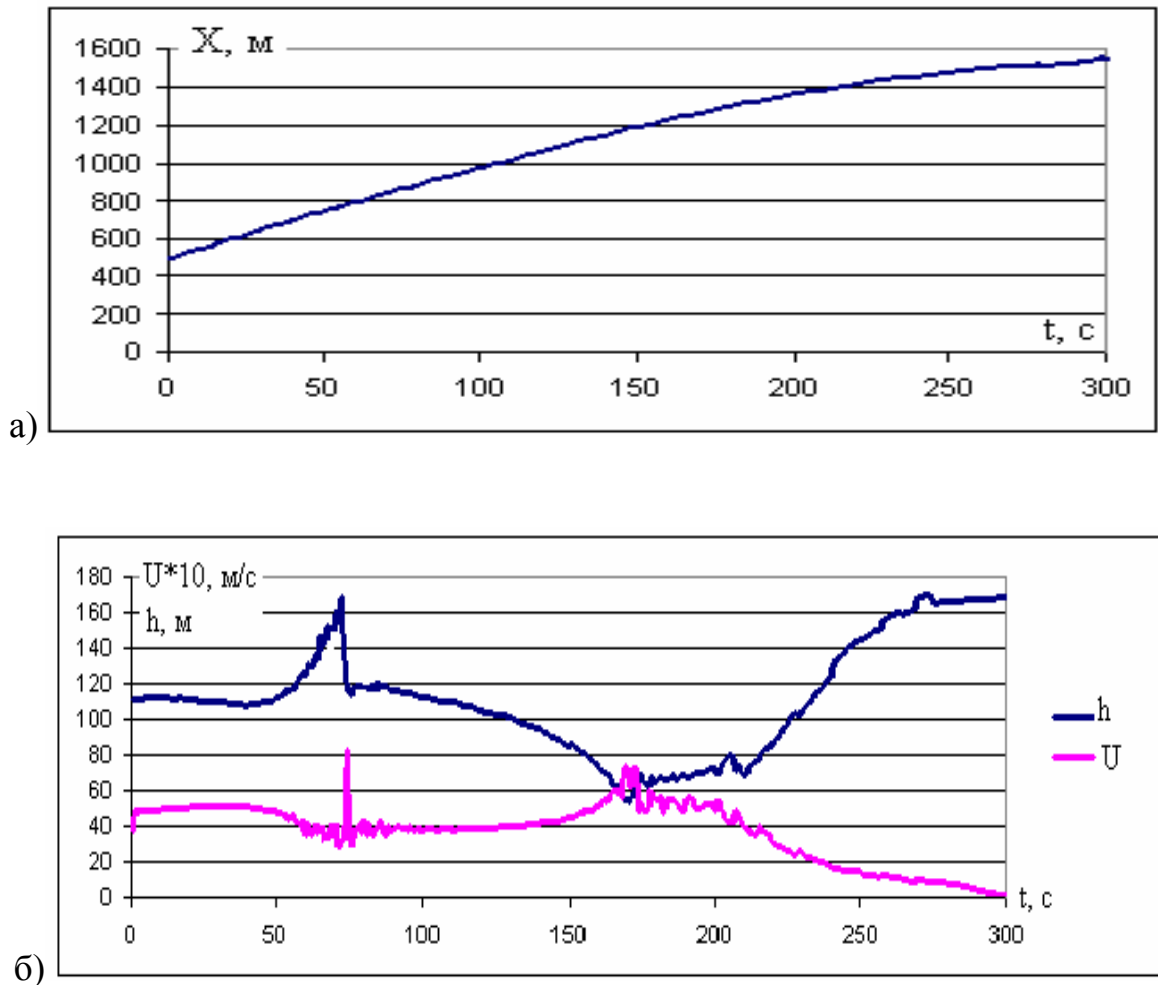


Рис. 3.17. Распределение координат (а), высот и скоростей (б) центра масс грунтового - потока в системе координат, связанной со склоном за все время расчета.

Интерес и актуальность данной проблемы определяется важностью решаемых задач и тем, что в настоящее время предпринимаются немалые усилия к решению подобных задач различными вариантами метода частиц [69, 70].

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 возведения плотины не встречающейся в мировой практике предъявляют особые требования к определению параметров обрушаемой массы с учетом

рельефа местности, строение и физико-механических характеристик массива, а также выбор место заложения взрывчатого вещества и при проектировании и их размещении на склоне.

Масштабы данного строительства вызывает необходимость проведение экспериментов для решения выше перечисленных задач. В данной работе с помощью компьютерного моделирования проведены численные эксперименты по выбору параметров обрушения. На диссертационной работе показано эффективность применение компьютерного моделирования для решения задач строительства плотины ГЭС взрывообвальным способом.

Основные результаты третьей главы:

Основные результаты третьей главы можно сформулировать следующим образом:

1. Предложенная модель гидродинамики позволяют адекватно описывать нестационарную динамику грунтового потока на сложном рельефе;
2. Компьютерное моделирование движение грунтового потока при строительстве плотины Камбарата ГЭС 1 дает возможность определять поле скоростей, форму плотины и время ее образования;
3. Разработанный алгоритм доведён до уровня программного обеспечения с развитой средой взаимодействия с пользователем, что позволяет производить численное моделирование оползневых процессов;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже приводятся основные результаты, полученные в диссертации:

1. Главная задача взрыва заключается в том, чтобы вывести горный массив на склоне из состояний равновесия. Вся остальная работа по дроблению, перемещению и упаковке горной массы в тело плотины можно возложить на освобожденной потенциальной энергией силу 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 1,5 раза быстрее. Особенно ценным является такой метод строительства плотин в настоящее время, когда 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 оказалось дешевле 2 раза и возведена 1,5 раза быстрее по сравнению с Бурлыкской взрывонабросной плотинной. Тем самым было доказано целесообразность возведения плотины Камбаратинской ГЭС №1 взрывообвальным способом, тем более 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, расчетами других авторов.

7. Проведены в полной нелинейной постановке численные эксперименты по расчету задач о выборе оптимальных параметров обрушаемой массы призмы обрушения в зависимости от варьируемых параметров в зависимости от размеров строившейся плотины.

8. Предложенный модель можно использовать для исследования движений снежных лавин, оползней и селевых потоков. Разработанная методика с необходимой точностью позволяет решать широкий круг задач со сложным рельефом. Математические модели на основе численного интегрирования укороченных 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.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность д.ф.-м.н., профессору Дуйшеналиеву Туратбеку Болотбековичу за постоянное внимание, многочисленные обсуждения и ценные замечания, способствовавшие успешному выполнению данной работы, а также за помощь и поддержку в процессе выполнения диссертационной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стокер Дж. Волны на воде. Математическая теория и приложения. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1959. – 617 с.
2. Эглит М.Э. Неустановившиеся движения в руслах и на склонах. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. – 96 с.
3. Богомолов С.В., Захаров Е.В., Зеркаль С.В. Математическое моделирование движения оползня-потока методом частиц // Труды X Международного симпозиума «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики (МДОЗМФ-2001)». – Херсон, 2001. – С. 69-71
4. Григорян С.С., Нилов Н.Н., Остроумов А.В., Федоренко В.С. Математическое моделирование горных обвалов и оползней больших объемов // Инженерная геология. – 1983. – № 6. – С. 61-73
5. Эглит М.Э. Расчет параметров лавин в зоне торможения и остановки // Материалы гляциологических исследований. Хроника обсуждений. – 1982. – Вып. 43. – С. 35-39.
6. Богомолов С.В., Замираева А.А., Карабелли Х., Кузнецов К.В. Консервативный метод частиц для квазилинейного уравнения переноса // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1998. – Т. 38. – № 9. – С. 1602-1607
7. Богомолов С.В., Кузнецов К.В. Метод частиц для системы уравнений газовой динамики // Математическое моделирование. – 1998. – Т. 10. – № 3. – С. 93-100
8. Богомолов С.В., Захаров Е.В., Зеркаль С.В. Моделирование волн на мелкой воде методом частиц // Математическое моделирование. – 2002. – Т. 14. – № 3. – С. 103-116
9. Зеркаль С.В. Апостериорная оценка погрешности метода частиц на моделях теории мелкой воды // Прикладная математика и информатика: Труды факультета ВМиК МГУ им. М.В.Ломоносова. Под ред. Д.П.Костомарова, В.И.Дмитриева. – 2002. – № 10. – С. 90-101

10. Rodriguez M.X., Bonet J., Kulasegaram S., Lok T.-S.L. Mesh-free Numerical Simulation of Debris Flow Avalanches // Proceedings of ann. conf. Assoc. of Compt. Mech. (ACME), UK – 2000
11. Kulasegaram S., Bonet J., Lok T.-S.L., Rodriguez-Paz M. Corrected Smooth Particle Hydrodynamics – A Meshless Method for Computational Mechanics // CD-Rom Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering “ECCOMAS-2000”. – Barcelona, – 11-14 September 2000. – 11 p.
12. Monaghan, J.J. Simulation of free surface flows with SPH [Текст] / J.J.
13. Monaghan, M.C. Thompson, K. Hourigan // Journal of computational physics. – 1994. – № 110. – P. 399-406.
14. Morris, J.P. Modeling low Reynolds number incompressible flows using SPH [Текст] / J.P. Morris, P.J. Fox, Y. Zhu // Journal of computational physics. – 1997. – № 136. – P. 214-226.
15. Monaghan, J.J. Smoothed Particle Hydrodynamics [Текст] // Reports on Progress in Physics. – 2005. – № 68, P. 1703-1759.
16. Liu, G.R. Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method [Текст] / G.R. Liu, M.B. Liu // World Scientific, 2003.
17. Koshizuka, S. A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation [Текст] / S. Koshizuka, H. Tamako, Y. Oka // Computational Fluid Dynamics. – 1995. – P. 29-46.
18. Koshizuka, S. Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method [Текст] / S. Koshizuka, A. Nobe, Y. Oka // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 1998. – P. 751-769.
19. Liu, W.K. Multiresolution Reproducing Kernel Particle Method for Computational Fluid Dynamics [Текст] / W.K. Liu, S. Jun, D.T. Sihling, Y. Chen, W. Hao // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 1997. – № 24. P. 1- 25.

20. Dilts, G.A. Moving-least-squares-particle hydrodynamics i: consistency and stability [Текст] // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1999. – 44(8). – P. 1115 – 1155.
21. Cummins, S.J. An SPH projection method [Текст] / S.J. Cummins, M. Rudman // Journal of computational physics. – 1999. – № 152. – P. 584-607.
22. Shao, S. Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flow with a free surface [Текст] / S. Shao, E.Y.M. Lo // Advances in Water Resources. – 2003. – № 26. – P. 787-800.
23. Brookshaw, L. A Method of Calculating Radiative Heat Diffusion in Particle Simulation [Текст] // Proc. ASA. – 1985. – 6 (2). – P. 207-210.
24. Коннор Дж., Бреббиа К. Метод конечных элементов в механике жидкости. / Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1979. – 264 с.
26. Dilts, G.A. Moving-least-squares-particle hydrodynamics ii: conservation and boundaries [Текст] // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2000. – 48(10). – P. 1503 – 1524.
27. Афанасьев, К.Е. Численное моделирование течений жидкости со свободными границами методами SPH и MPS. [Текст] / К.Е. Афанасьев, А.Е. Ильясов, Р.С. Макаrchук, А.Ю. Попов // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – Спец. Выпуск. – С. 26-44.
28. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. – М.: Мир, 1977. – 622 с.
29. Рыскин Н.М., Трубецков Д. И. Нелинейные волны: Учеб. пособие для вузов.-М.: Наука. Физматлит, 2000. -272 с.
30. Ламб Г. Гидродинамика. М.-Л., 1947.
31. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. Наука, М., 1987.
32. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. Наука, М., 1987.
33. Сидоров А. Ф. О некоторых течениях газа в поле тяжести. ПММ, 42, 1978, 96–104.
34. Сарбалиев А.Ш. Моделирование движения грунтового потока при строительстве гидротехнических сооружений взрывообвальным способом

методом частиц. Труды международной конференции «80 лет подготовки инженерных кадров для оборонно- промышленного комплекса и вооруженных сил страны». Санкт-Петербург, 2012г.

35. Дерябин С. Л., Чуев Н. П. Сферически-симметричное истечение самогравитирующего газа в вакуум. Там же, 58, вып. 2, 1994, С. 77–84.

36. Сарбалиев А.Ш. Аппроксимация давления грунтового потока в методе частиц.Труды международной конференции «Современные проблемы механики сплошных сред». Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек 2012 г.

37. Антонов В. А., Тимошкова Е. И., Холшевников К. В. Введение в теорию ньютоновского потенциала. Наука, М., 1988.

38. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. Наука, М., 1981.

39. Дуйшеналиев Т.Б., Мекенбаев Б.Т., Барсанаев С.Б.. Сарбалиев А.Ш. Моделирование движения грунтовых потоков на наклонных поверхностях // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек 2009 г., №17. Стр.374-376. .

40. Сарбалиев А.Ш. Численное моделирование движение потока // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек 2010 г., №21. Стр.117-123.

41. Сарбалиев А.Ш. Физическая модель движения грунтового потока // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек 2010 г., №21. Стр.114-117.

42. Сарбалиев А.Ш. Выбор оптимальных параметров обрушаемой массы при строительстве плотины взрывообвальным способом //Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек 2012 г., №26. Стр.110-112.

43. Сарбалиев А.Ш. Уравнение для прогнозирования условий разрушения горных пород при высоких давлениях // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек 2012 г., №26. Стр.114-117.

44. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Наука, М.,

45. Франк А. М. Дискретные модели несжимаемой жидкости. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. - 224 с.

46. Evstigneev N. Integration of 3D incompressible free surface Navier-Stokes equations on unstructured tetrahedral grid using distributed computation on TCP/IP networks // Proc. of the VII International conf. "Advances in Fluid Mechanics". Oxford, 2008. 15–20 may. P. 194–208.
47. Воробьев А.П. Бессеточный метод сглаженных частиц для численного моделирования гидродинамических процессов при тяжёлых авариях на ядерных энергетических установках. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Обнинск, 2010. 26 с.
48. Борубаева Т.Ж., Штейнбах Н.А., Маликов Б.К.. Методика моделирования взрыва зарядов разной формы в грунтах, Сб. "Действие направленных: взрывов на склонах", Изд-во "Илим", Фрунзе» 1979.
49. Механический эффект подземного взрыва, М.: Недра, 1971.
50. Терметчиков М.К., Проходка канав методом взрывания на выброс. Издательство "Илим", Фрунзе, 1971.
51. Отчет по теме "Изучение сейсмического действия направленных взрывов в скальных породах для условий экспериментального взрыва на р. Бурлыккия (применительно к задачам строительства Камбаратинской плотины)", Фрунзе, 1975.
52. Н.А. Штейнбах, Т.Ж.Борубаева, Б.Маликов. Влияние форму заряда и крутизны склона на результаты взрыва. Сб. "Направленные взрывы на склонах", Изд-во "Илим", «Фрунзе» 1980. 22-33 с.
53. Гунченко А.И., Штейнбах Н.А., Волчанская В.А. Расчет штольневых линейно-распределенных зарядов выброса. – В сб.: Взрывное дело, 1978.
54. Авдеев Ф.А., Барон В.Л., Блейман И.Л. Производство массовых взрывов. – М.: Недра 1977.
55. Черниговский А.А. Применение направленного взрыва в горном деле и строительстве. – М.: Недра, 1976.
56. Михайлов В.О. Классификация численных математических моделей селевых и склоновых процессов. Инженерная геология, сентябрь 21. С.56-62.

57. Барсанаев С.Б. О некоторых особенностях действия зарядов взрывчатого вещества (ВВ) на склонах. Сб. "Направленные взрывы на склонах", Изд-во "Илим", «Фрунзе», 1980. 3-9 с.
58. Lu Min, Kazhikhov A. V., Seiji Ukai. Global solutions to the Cauchy problem of the Stokes approximation equations for two-dimensional compressible flow // *Sci. Bull. Josai Univ. Sp. Issue.* 1998. N 5. P. 155–174.
59. Lions P. L. *Mathematical topics in fluid mechanics. Compressible models.* Oxford: Oxford Univ. Press, 1998. V. 2.
60. Lewandowski R. *Analyse mathématique et océanographie.* Paris: Massone, 1997.
61. Кочин Н. Е. Об упрощении уравнений гидромеханики для случая общей циркуляции атмосферы // *Тр. Главной геофизической обсерватории.* 1936. Вып. 4. С. 21–45.
62. Антонцев С. Н., Кажихов А. В., Монахов В. Н. *Краевые задачи механики неоднородных жидкостей.* Новосибирск: Наука, 1983.
63. Nash J. Le problem de Cauchy pour les equations differentielles d'un fluide general // *Bull. Soc. Math. France.* 1962. V. 90, N 4. P. 487–491.
64. Matsumura A., Nishida T. The initial value problem for the equation of motion of viscous and heat-conductive gases // *J. Math. Kyoto Univ.* 1980. V. 20, N 1. P. 67–104.
65. Brech D., Gullen-Gonzales F., Masmoudi N., Rodrigues-Bellido M. A. On the uniqueness for the two-dimensional primitive equation // *Differential Integral Equations.* 2001. V. 16, N 1. P. 77–94.
66. Bresch D., Kazhikhov A., Lemoine J. On the two-dimensional hydrostatic Navier–Stokes equations // *SIAM J. Math. Anal.* 2004. V. 36, N 3. P. 796–814.
67. Gullen-Gonzales F., Masmoudi N., Rodrigues-Bellido M. A. Anisotropic estimates and strong solutions of the primitive equations // *Differential Integral Equations.* 2001. V. 14, N 11. P. 1381–1400.

68. Y.C.Tai, S.Noelle, J.M.N.T.Gray, and K.Hutter. Shock-Capturing and Front-Tracking Methods for Granular Avalanches // *Journal of Computational Physics* 175, 2002. P. 269-301.
69. Rodriguez M.X., Bonet J., Kulasegaram S., Lok T.-S.L. Mesh-free Numerical Simulation of Debris Flow Avalanches // *Proceedings of ann. conf. Assoc. of Compt. Mech. (ACME), UK – 2000.*
70. Kulasegaram S., Bonet J., Lok T.-S.L., Rodriguez-Paz M. Corrected Smooth Particle Hydrodynamics – A Meshless Method for Computational Mechanics // *CD-Rom Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering “ECCOMAS-2000”.* – Barcelona, – 11-14 September 2000. – 11 p.
71. Avolio M.V., Di Gregorio S., Mantovani F. et al. Simulation of the 1992 Tessina landslide by a cellular automata model and 8. future hazard scenarios // *JAG: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2000. V. 2. № 1.P. 41–50.
72. Mikoš M., Fazarinc R., Majes B. et al. Numerical simulation of debris flows triggered from the Strug rock fall source area, 30. W Slovenia // *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 2006. № 6. P. 261–270.
73. O’Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation // *Journal of Hydraulic Engineering.* 1993. V. 119. № 2. P. 244–259.
74. Pastor M., Herreros I., Fernández Merodo J.A. et al. Modelling of fast catastrophic landslides and impulse waves induced by 32. them in fjords, lakes and reservoirs // *Engineering Geology.* 2009. V. 109. № 1–2. P. 124–134.
75. Pouya A., Léonarda C., Alfonsi P. Modelling a viscous rock joint activated by rainfall: Application to the La Clapière landslide 33. // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2007. V. 44. № 1. P. 120–129.
76. Pudasaini S.P., Hutter K. *Avalanche Dynamics: Dynamics of rapid flows of denses granular avalanches.* New York: Springer, 34. 2006. P. 115–166.

77. Schilling S.P. LAHARZ: GIS Programs for Automated Mapping of Lahar-Inundation Hazard Zones // U.S. Geological Survey. 35. Open-File Report. Reston, VA, 1998. P. 98–638.
78. Hungr O.A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches // Canadian Geotechnical Journal. 21.1995. V. 32. № 4. P. 610–623.
79. Hungr O., McDougall S. Two numerical models for landslide dynamic analysis // Computers & Geosciences. 2009. V. 35. № 22. 5. P. 978–992.
80. Imran J., Harff P., Parker G.A numerical model of submarine debris flow with graphical user interface // Computers & Geo- 23. sciences. 2001. V. 27. № 6. P. 717–729.
81. Chen H., Lee C.F. A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes // Geomorphology. 2003. V. 51. № 4. P. 269–288.
82. Crosta G.B., Imposimato S., Roddeman D.Numerical modelling of entrainment/deposition in rock and debris avalanches // 14.Engineering Geology. 2009. V. 109. № 1–2. P. 135–145.
83. D’Ambrosio D., Di Gregorio S., Iovine G. et al.Simulating the Curti-Sarno debris flow through cellular automata: the model 15. SCIDDICA (release S2) // Physics and Chemistry of the Earth. 2002. Parts A, B, C. V. 27. № 36. P. 1577–1585.
84. D’Ambrosio D., Iovine G., Spataro W., Miyamoto H.A macroscopic collisional model for debris-flows simulation // Environ- 16. mental Modelling & Software. 2007. V. 22. № 10. P. 1417–1436.
85. Dorren L., Seijmonsbergen A.Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale 17. // Geomorphology. 2003. V. 56. № 1–2. P. 49–64.
86. Dattilo G., Spezzano G. Simulation of a cellular landslide model with CAMELOT on high performance computers // Parallel 18. Computing. 2003. V. 29. № 10. P. 1403–1418.

87. Chiessi V., D'Orefice M., Mugnozza G. et al. Geological, geomechanical and geostatistical assessment of rockfall hazard in 12. San Quirico Village (Abruzzo, Italy) // *Geomorphology*. 2010. V. 119. № 3–4. P. 147–161.
88. Dorren L., Seijmonsbergen A. Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale 17. // *Geomorphology*. 2003. V. 56. № 1–2. P. 49–64.
89. Guzzetti F., Crosta G., Detti R., Agliardi F. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls // *Computers & Geosciences*. 2002. V. 28. № 9. P. 1079–1093.
90. Stoffel M., Wehrli A., Kühne R. et al. Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation 39. model // *Forest Ecology and Management*. 2006. V. 225. № 1–3. P. 113–122.
91. Woltjer M., Rammer W., Brauner M. et al. Coupling a 3D patch model and a rockfall module to assess rockfall protection in 44. mountain forests // *Journal of Environmental Management*. 2008. V. 87. № 3. P. 373–388.
92. Михайлов В.О. Трехмерная математическая модель обвальных процессов // *Вестник МГУ. Серия 5. География*. 2011. 2. № 4. С. 53–58.
93. Stead D., Coggan J.S. Numerical modelling of rock slopes using a total slope failure approach / Evans, S.G.; Scarascia Mugnozza, G.; Strom, A.; Hermanns, R.L. (Eds.) *Landslides from Massive Rock Slope Failure. New Models for Hazard Assessment. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Massive Rock Slope Failure: New Models for Hazard Assessment, Celano, Italy, 16–21 June 2002. NATO Science Series IV*. V. 49. P. 129–138.
94. Wu J.-H. Seismic landslide simulations in discontinuous deformation analysis // *Computers and Geotechnics*. 2010. V. 37. № 45. 5. P. 594–601.
95. Ромашев А.Н. Особенности действия крупных подземных взрывов. -М., Недра, 1980.
96. Сборник "Взрывное дело". Взрывная техника в строительстве и мелиорации. -М., Недра, 1980.
97. Адушкин В.В. и др. Инструментальное наблюдение механического и

- сейсмического действия взрыва на реке Бурлыкя. Журнал "Гидротехническое строительство", №5, 1977.
98. Технические правила ведения взрывных работ в энергетическом строительстве. -М., Энергия, 1972.
99. Ромашев А.Н., Барсанаев СБ. О структуре и механизме образования завальной плотины на р. Кара-Суу, Взрывное дело, №76/33. -М.:Недра, 1976г.,-С.114-177.
100. Барсанаев СБ. Состояние и перспективы возведения каменно-набросных плотин взрывом. В сб "Применение взрыва в горном и строительном деле". -Фрунзе, Илим, 1976.
101. Белоцерковский О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Физматлит, 1994.
102. Евстигнеев Н. М. Интегрирование уравнения Пуассона с использованием графического процессора технологии CUDA// Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 10. С. 268–274.
103. Евстигнеев Н. М. Численный метод решения уравнений Навье–Стокса на неструктурированных сетках с применением Лагранжево – Эйлерового метода // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. 1 (93). С. 163–170.
104. Huang. K. Statistical Mechanics, 2nd ed. WELLY, ISBN: 978-0-471-81518-1, 1988, http://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/2_3/toolkit/docs/NVIDIA_CUDA_Programming_Guide_2.3.pdf.
105. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: КолосС, 2008. 656 с.
106. Божинский А.Н., Назаров А.Н. Динамика двухфазного селевого потока // Вестник МГУ. Серия 5. География. 1999. № 1. 5. С. 15–19.
107. Трофимов А.М., Московкин В.М. Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань: Изд-во Казанского унив-та, 1983, 218 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПЛОТИН	10
1.1. Способы возведения плотин	10
1.2. Сооружение плотин методом направленных взрывов	16
1.3. Бурлыкский опытный взрыв	23
1.4. Основные предпосылки для образования естественных завальных плотин в горных реках Средней Азии	26
1.5. К механизму естественного завала р. Кара-Суу	27
1.6. Строительство дамбы -моста на р. Ак-Суу взрывным способом	32
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА МЕТОДОМ ЧАСТИЦ	35
2.1. Обзор численных математических моделей селевых и склоновых процессов	35
2.2. Физическая модель движения потока	39
2.3. Уравнения равновесия потока	41
2.4. Уравнение неразрывности	45
2.5. Дифференциальное уравнение неустановившегося движения несжимаемой вязкой жидкости	47
2.6. Закон сохранения энергии потока	50
2.7. Дискретизация потока	52

2.8. Силы трения потока	55
2.9. Квадратичное аппроксимация давление	57
2.10. Алгоритм решения задачи	65
2.11. Тестирование программы на модельных задачах.	67
1. Задача о разрушении плотины.	67
2. Движения жидкости (воды) при постоянном наклоне склона	73
3. Движения грунтового - потока по склону с переменным углом наклона	77
Основные результаты второй главы	79
ГЛАВА 3. СТРОИТЕЛЬСТВО ПЛОТИН ВЗРЫВООБВАЛЬНЫМ СПОСОБОМ	80
3.1. Действия зарядов взрывчатых веществ (ВВ) на склонах	81
3.2. Исследование движение грунтового – потока на склонах при строительстве плотины взрывообвальным способом.	89
Основные результаты третьей главы	101
Заключение	102
ЛИТЕРАТУРА	104