

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ И МЕХАНИКИ ГОРНЫХ ПОРОД

Диссертационный совет Д 25.06.334

На правах рукописи

УДК 532.546, 628.36(575.2)

ОМУРАЛИЕВ САГЫНДЫК БЕКИШЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНФИЛЬТРАЦИИ
ЖИДКОСТИ В ГРУНТАХ ОПОЛЗНЕОПАСНЫХ СКЛОНОВ**

25.00.20 – «Геомеханика, разрушение пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек – 2007

Работа выполнена в Институте физики и механики горных пород
НАН КР

Научные руководители: **доктор технических наук, член-корр.
НАН КР, профессор Кожогулов К.Ч.**

**доктор физико-математических наук,
профессор Джаманбаев М.Дж.**

Официальные оппоненты: **доктор физико-математических наук
Манжиков Б.Ц.**

**доктор физико-математических наук,
профессор Бийбосунов Б.И.**

Ведущие организации:

- 1. Кыргызско-Российский Славянский университет**
- 2. Кыргызский Государственный Университет
строительства, транспорта и архитектуры**

Защита состоится **21 сентября 2007 года в 14-00 ч.** на заседании
диссертационного совета Д 25.06.334 при Институте физики и механики
горных пород НАН КР по адресу: 720035, Кыргызская Республика, г. Бишкек,
ул. Медерова, 98. т. 54-11-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

Автореферат разослан _____ **2007** года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Ю.Г. Алешин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Природные и природно-техногенные катастрофы в виде оползней происходят в мире ежегодно и часто приводят к значительному материальному ущербу и человеческим жертвам.

В Кыргызской Республике оползневые процессы в основном развиты на территории Юго-Западного Тянь-Шаня. При этом, для юга Кыргызстана, воздействие атмосферных осадков на грунты является одним из главных факторов, влияющих на формирование и активизацию оползней, т.к. климат этого региона характеризуется интенсивным снеготаянием и выпадением большого количества осадков в весенне-осенний период.

По глубине захвата склона оползни можно разделить на два типа:

а) поверхностные; б) глубинные

Поверхностные оползни образуются в результате переувлажнения верхней части толщи грунта, сопровождаются изменением консистенции и уменьшением сопротивления сдвигу при инфильтрации дождевых вод. Вода, просочившаяся в проницаемую породу, пропитывая ее, значительно увеличивает вес породы, и создает неустойчивость масс. В этих случаях в качестве одного из основных критериев оползневой опасности принимается критическая глубина промачивания. Если во время выпадения осадков глубина промачивания достигает этой критической величины, то возникновение оползня неизбежно.

Анализ происшедших к настоящему времени оползней, а также литературных источников показал, что влияние таких факторов, как интенсивность и продолжительность дождя, механический состав грунтов, и глубина промачивания на образование оползня пока изучены недостаточно.

Связь темы диссертации с основными научно-исследовательскими работами. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Института физики и механики горных пород НАН Кыргызской Республики по проекту: «Обоснование и выбор современных инженерных методов расчета и контроль геотехнических объектов и технологий при освоении горных территорий в тектонически-активных регионах», раздел: «Обоснование и выбор инженерных методов оценки устойчивости геотехнических систем «склон-сооружение»» (№ гос. регистрации: РК 0002352, 2001-2002 гг.); по проекту: «Разработка научно-методических основ и оценка устойчивости геотехнических сооружений в горно-складчатых областях», раздел: «Разработка комплексного метода оценки повышения устойчивости оползнеопасных склонов и бортов нагорных карьеров» (№ гос. регистрации: РК 0002863, 2003-2005 гг.); по проекту: «Разработка теоретических основ оценки геомеханических процессов и прогноз их развития при освоении горных регионов», раздел: «Разработка инженерных методов управления устойчивостью оползнеопасных склонов и

геотехнических систем (склон-выемка) в горно-складчатых областях» (№ гос. регистрации: РК 0004155, 2006-2008 гг.).

Целью настоящей работы является моделирование процесса инфильтрации атмосферных осадков в грунты, с учетом влияния интенсивности дождя, влагосостояния и механического состава покровных отложений оползнеопасных склонов при различных углах их наклона.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи исследований**:

1. Построение математических моделей процесса промачивания грунтов атмосферными осадками с учетом различных оползнеобразующих факторов.

2. Разработка методики расчета глубины промачивания атмосферных осадков в грунты.

3. Установление зависимости глубины и скорости промачивания грунтов от времени, интенсивности атмосферных осадков, механического состава, угла наклона склона в лабораторных условиях.

4. Сопоставление результатов расчета по построенной математической модели с экспериментальными данными и данными известных работ.

Научная новизна полученных результатов:

- Предложен новый подход к математическому моделированию процесса инфильтрации атмосферных осадков в пористую среду, с учетом силы-силы аналога Архимеда, изменения пористости, влажности грунта и интенсивности дождя на основе модели переменной массы.

- Обосновано применение предлагаемой математической модели для изучения процесса инфильтрации суглинистых покровных отложений оползнеопасных склонов.

- Получено уравнение баланса воды, учитывающее влияние угла наклона склона на глубину промачивания.

- Установлено, что глубина промачивания склонов с углами наклона поверхности 10^0 - 30^0 (при интенсивности дождя $\mathcal{D}_0 = 0,25$ мм/мин, за два часа насыщения грунта) соответственно в 1,15-1,49 раза меньше, чем глубина промачивания горизонтальной поверхности в лабораторных условиях.

Практическая значимость полученных результатов. Практическое значение работы заключается в том, что разработанные методики и результаты расчетов по построенной математической модели позволяют оперативно определять необходимые параметры инфильтрационных процессов на основании определения параметров водно-физических свойств, и предварительно оценивать по определяемой глубине промачивания фактическую поверхность скольжения.

Экономическая значимость полученных результатов. Значение результатов исследований позволяет снизить социальный и материальный ущерб государства и населения от опасностей проявления оползневых процессов.

Основные научные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Математическая модель инфильтрации воды в пористую среду, учитывающая интенсивность атмосферных осадков, пористость, влажность грунта, угол наклона склона.

2. Экспериментально установленные зависимости влияния на процессы инфильтрации воды в покровных отложениях оползнеопасных склонов таких факторов, как интенсивность дождя, влажность грунта, механический состав грунтов и угол наклона склона.

3. Результаты экспериментальных исследований по выявлению зависимости влияния интенсивности атмосферных осадков, механического состава образцов на глубину и скорость промачивания грунтов:

- для образцов с содержанием глины и песка (80:20; 60:40; 40:60) процентов скорость промачивания возрастает в $1,2 \div 2$ раза;

- для образцов с содержанием глины и песка (20:80) процентов скорость промачивания возрастает в 5,6 раза по сравнению с серией образцов с содержанием глины и песка (40:60) процентов.

Личный вклад соискателя состоит в разработке методики исследований; анализе и обобщении результатов; разработке и создании математической модели с учетом количества выпавших атмосферных осадков и скорости их просачивания в покровных суглинистых отложениях оползнеопасных склонов; постановке задачи о инфильтрационных процессах при оценке оползневой опасности и получении ее аналитического решения; проведении лабораторных и натурных исследований по определению водно-физических свойств глинистых грунтов и влияния механического состава, угла наклона склона и интенсивности атмосферных осадков на глубину и скорость промачивания; выявлении зависимости скорости промачивания от интенсивности атмосферных осадков и процентного содержания песчаных фракций.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований диссертационной работы обсуждались и получили одобрение на научных семинарах ИФиМГП НАН КР, республиканских и международных конференциях: на конференции молодых ученых КНУ им. Ж. Баласагына, посвященной 70-летию высшей школы Кыргызстана (Бишкек, 2002 г.); на Международной научно-практической конференции, посвященной международному Году гор «Экологические проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов гор Тянь-Шаня» (Бишкек, 2002 г.); на Международной научно-технической конференции, посвященной 2200-летию Кыргызской Государственности и 10-летию Кыргызского горно-металлургического института «Недра гор Кыргызстана – народу» (Бишкек, 2003 г.); на Международной научно-практической конференции «Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии и техника орошения» (Коломна (Россия), 2004 г.); на Международном научно-техническом симпозиуме, посвященном 50-летию КТУ им. И. Раззакова «Образование через науку» (Бишкек, 2004 г.); на республиканской научно-методической конференции,

посвященной 50-летию КНТУ им. И. Раззакова и 75-летию профессора Усубакунова Р.У. «Проблемы прикладной математики, механики и инженерного образования» (Бишкек, 2005 г.); на заседаниях Ученого Совета ИФ и МГП НАН Кыргызской Республики (2002-2006 гг.);

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав и выводов, изложенных на 111 стр. машинописного текста, содержит 22 таблицы, 30 рисунков, список литературы из 94 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность научным руководителям: член корр. НАН КР, д.т.н., проф. К.Ч. Кожогулову и д.ф.-м.н., проф. М. Дж. Джаманбаеву за постановку задачи и ценные советы при выполнении работы. Автор также признателен д.т.н. Никольской О.В., к.т.н. Г. Н. Фалалееву за оказанное содействие и помощь.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, основные цели и задачи исследования, научная новизна, практическая и экономическая значимость полученных результатов и другие классификационные признаки диссертации, приведена структура и содержание работы.

В первой главе приводится обзор отечественной и зарубежной литературы по исследуемой тематике, приведены типы и характеристика оползней, причины образования оползней под влиянием метеорологических условий, инфильтрации атмосферных осадков в грунт, влияние крутизны склона на глубину промачивания грунтов.

В связи с усилением оползневой активности, изучение оползней, образующихся в суглинистых отложениях горных и предгорных районов Кыргызстана, в настоящее время, приобретает большое значение. По результатам визуального изучения этих оползней можно проследить зависимость между некоторыми климатическими факторами и оползневыми смещениями грунтов. В естественных условиях увеличение нагрузки может происходить только за счет насыщения водой толщи грунта.

Вопросам изучения оползней, с точки зрения механизма возникновения, методиками расчета, моделирования и стабилизации занимались многие ученые. Широкую известность получили работы Е. П. Емельяновой, М.Н. Гольдштейна, К.А. Гулакяна, Т.С. Золотарева, Н.Н. Маслова, Р. А. Ниязова, И.В. Попова, И.С. Рогозина, Г.И. Тер-Степаняна, И.О. Тихвинского, И. Т. Айтматова, И. Б. Бийбосунова, К. Ч. Кожогулова, М. Дж. Джаманбаева, О. В. Никольской, Ю.Г. Алешина, И.А. Торгоева, Г. Н. Фалалеева, Б.И. Бийбосунова, К. Дж. Усенова и др.

Эти исследования показывают, что на склонах возникают повышенные гидростатические и гидродинамические давления, способствующие

возникновению оползней. С такими изменениями связаны многие оползни, которые происходят в виде оплывин, сплывов и оползней-потоков.

В предгорных и горных районах Кыргызстана более 40% распространены поверхностные оползни, которые и являются предметом исследований данной диссертационной работы.

Для условий Средней Азии Ниязов Р.А. и Петрухина М.М. пришли к выводу, что в период интенсивного выпадения осадков и таяния снега происходит наибольшая инфильтрация поверхностных вод вглубь склонов и в область разгрузки. В результате появляется большое количество временных источников, которые создают в толще лессовых грунтов зоны повышенной влажности и пониженной прочности.

Определение глубины просачивания воды с поверхности вглубь грунта, при решении многих практических задач, имеет очень важное значение, особенно, при оценке устойчивости оползнеопасных склонов. В общем случае, движение воды при инфильтрации происходит под действием сил тяжести, сил сопротивления, капиллярных сил, сил инерции и давления почвенного воздуха. А.И. Будаговский отметил, что из пяти сил, действующих при инфильтрации воды в грунт, двумя можно пренебречь. Как показывают непосредственные вычисления, силы инерции пренебрежимо малы. Давление воздуха, вытесняемого водой из грунта, также не велико.

1. Силы тяжести (F_T) обуславливаются весом столба воды, который определяется мощностью насыщенного слоя (y) и весом столба воды (h_H), находящегося на поверхности почвы:

$$F_T = \rho g (y + h_H), \quad (1)$$

где ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

2. Силы сопротивления (F_c) пропорциональны первой степени скорости, а также мощности насыщенного слоя грунта:

$$F_c = \alpha \vartheta y. \quad (2)$$

Здесь α – коэффициент пропорциональности; ϑ – скорость движения фронта впитывания.

3. Капиллярные силы (F_k)

$$F_k = \rho g h_k, \quad (3)$$

где h_k – средняя высота капиллярного поднятия или, точнее, высота столба воды, вес которого равен капиллярным силам.

4. Силы инерции (F_u), направленные в сторону движения колонны впитывания, равны произведению массы на ускорение:

$$F_u = \rho y \frac{d \vartheta}{dt}$$

или

$$F_u = \rho y \vartheta \frac{d \vartheta}{dy}. \quad (4)$$

5. Силы давления почвенного воздуха (F_6):

$$F_e = \frac{\rho g \lambda \mathcal{G} (L - y)}{k}, \quad (5)$$

где $\lambda = \frac{v_e}{v}$

k – коэффициент фильтрации для воды; v – соответствующий ей коэффициент кинематической вязкости; v_e – коэффициент кинематической вязкости воздуха; L – высота колонны грунта; y – положение фронта впитывания.

При выпадении осадков не вся влага впитывается в грунт, часть ее стекает со склона, и образуется фронт промачивания. Поэтому крутизна склона является одним из факторов, влияющим на инфильтрацию дождя в грунт. Этому вопросу посвящен ряд как полевых, так и лабораторных исследований. Из известных экспериментов в этой области следует отметить наблюдения Ф.П. Серика, И.Н. Торгушникова, Н.А. Пузакова, Б.В. Гусак, Дьюли, Цинга и др.

Критический анализ литературных источников показал, что попытки теоретических решений обычно были оторваны от экспериментальных исследований. С другой стороны, экспериментальные исследования не увязывались с теорией и потому не могли дать необходимый материал для анализа процесса инфильтрации.

Во второй главе приведен новый подход к математическому моделированию процесса инфильтрации воды в пористую среду, методике лабораторных исследований по определению глубины и скорости промачивания грунтов на модельных материалах и промачивания грунтов при различных углах склона.

Систему (в частности, вода в грунте), масса которой непрерывно изменяется со временем, т.е. в результате непрерывного присоединения к ней или отделения от нее частиц, принято называть *системой переменной массы*. Если происходит только присоединение (или только отделение) частиц, то предлагается уравнение:

$$M \frac{d\mathcal{G}}{dt} = F + (u - \mathcal{G}) \frac{dM}{dt}, \quad (6)$$

где u – абсолютная скорость присоединения (или отделения) частиц; \mathcal{G} – абсолютная скорость с массой $M(t)$.

Величина $u_r = u - \mathcal{G}$ представляет собой относительную (по отношению к основной точке с массой M) скорость присоединения (отделения) частиц.

Если абсолютная скорость частиц равна нулю, т.е. $u=0$, то уравнение (6) можно представить в виде

$$\frac{d(M\mathcal{G})}{dt} = F, \quad (7)$$

если же $u_r = 0$, то уравнение (6) принимает такой же вид, как для точки постоянной массы т.е.

$$M \frac{d\mathcal{G}}{dt} = F, \quad (8)$$

однако M в левой части является при этом величиной переменной.

Будем считать, что при моделировании процесс насыщения по глубине является одномерным, и масса воды изменяется в почве с течением времени. Тогда можно отметить особенность этого процесса, а именно: впитывание воды в сухой почве (при первой подаче) происходит медленнее, чем в насыщенной почве. Существуют различные подходы моделирования такого рода процессов. Математические модели таких процессов представляются сложными дифференциальными уравнениями в частных производных, аналитическое решение которых затруднительно.

В данной работе предлагается новый подход к математическому моделированию процесса просачивания воды в пористую среду, основанный на модели переменной массы с учетом введенной новой силы-силы аналога Архимеда.

В диссертации предложено уравнение инфильтрации воды в грунт при следующем предположении, что насыщение грунта водой происходит за счет комплекса сил:

- 1) Силы собственного веса.
- 2) Впервые полагается, что на процесс впитывания влияет аналог Архимедовой силы, т.е. сила вытеснения скелета грунта из насыщенной водной среды. Эта сила равна массе воды, которая определяется объемом скелета грунта в водной среде и направлена в данном процессе в сторону силы тяжести воды. В реальном случае эта сила характеризует силу всасывания воды в почву.
- 3) Соппротивление среды к просачиванию воды.
- 4) Для характеристики изменения содержания воды в грунте вводится сила за счет изменения массы.

Для моделирования данного процесса используем уравнение (7) с учетом вышеупомянутых предположений. Тогда уравнение инфильтрации воды в грунт имеет вид

$$M \frac{d\mathcal{G}}{dt} = gM + F_{a.архим.} - F_{c.c} - \mathcal{G} \frac{dM}{dt} \quad (9)$$

Хорошее совпадение экспериментальных данных с аналитическими и численными решениями модели будет свидетельствовать о достоверности математической модели. Для этого была реализована методика проведения эксперимента на конкретных образцах грунта, отобранных на местах прошедших оползней.

Лабораторные эксперименты имели целью оценить раздельное влияние различных факторов, определение свойств грунтов и анализа экспериментальных данных.

Основной задачей экспериментальных исследований на модельных материалах, содержащих глину и песок в различных процентных

соотношениях, являлось установление влияния количества и продолжительности осадков на глубину и скорость промачивания, а также установление влияния угла наклона поверхности склона на глубину промачивания покровных суглинков.

Для проведения лабораторных исследований по определению глубины и скорости промачивания грунтов на модельных материалах была создана установка для промачивания грунтов.

В качестве основного материала образцов использованы покровные лессовидные суглинки. Наполнителем в образцах является речной песок, просеянный через сито для удаления крупных частиц.

Также была создана специальная установка, которая предназначена для исследования промачивания грунта при различных углах наклона поверхности склона (10^0 , 20^0 , 30^0).

В качестве объекта исследований выбран склон горы Боз-Болток в пределах поселка Чон-Арык Чуйской области. Для каждого угла наклона в 10^0 , 20^0 , 30^0 определяется среднее значение глубины промачивания в зависимости от длины склона L (см) и продолжительность дождевания. При этом глубина промачивания определялась следующими условиями опыта: интенсивность дождя $g_0 = 0,25$ мм/мин; продолжительность дождевания составляла от 20 до 120 минут через отрезок времени, равный 20 минут.

Среднее значение Y_I^* глубины промачивания для каждого отрезка времени вычисляется по формуле

$$Y_I^* = \frac{\sum l_j y_j}{L}, \quad (10)$$

где $L = \sum l_j$, ($j=1,2,3,4$)

В третьей главе приведены результаты моделирования процесса инфильтрация атмосферных осадков в покровных отложениях оползнеопасных склонов, учитывающие изменение их пористости в зависимости от влажности суглинистого грунта, а также интенсивности дождя.

Моделируя инфильтрационные течения в пористых средах при некоторых, упрощающих физико-механических допущениях, и применяя современный математический аппарат, дана количественная и качественная оценка склоновых процессов для получения новых данных о развитии и активизации оползней.

Когда атмосферные осадки полностью просачиваются в грунт, т.е. на поверхности грунта отсутствует слой воды, то масса воды на глубине промачивания y будет равна

$$M(t) = \rho t y, \quad (11)$$

где ρ – плотность воды; t – пористость или недостаток насыщения грунта; y – глубина промачивания;

Тогда, предлагается уравнение баланса массы воды в следующем виде:

$$\rho \mathcal{G}_0 t = \rho m y, \quad (12)$$

где левая часть представляет количество воды, выпавшее за время t , а правая часть представляет количество этой же воды, впитавшейся в грунт за это же время t . Здесь \mathcal{G}_0 – интенсивность осадков; t – время.

Инерционной силой можно пренебречь, так как процесс насыщения происходит очень медленно. Тогда, (9) переписывается в виде:

$$\frac{d\mathcal{G}}{dt} = g + \frac{(1-m)g}{m} - \frac{(gy - k^2)}{kmy} \mathcal{G} - \mathcal{G}^2 \frac{1}{my} = 0, \quad (13)$$

где $\mathcal{G} = m \frac{dy}{dt}$ – скорость впитывания; g – ускорение свободного падения; k – коэффициент фильтрации грунта.

Уравнение (13) решается численно методом Рунге-Кутты с начальным условием $y(0) = 0$. Нелинейность модели (13) делает ее сложной для расчета. Для этого упростим модель до линейного вида и сравним результаты расчетов, тем самым выясним вклад нелинейного слагаемого. Представим уравнение (9) пренебрегая квадратным членом скорости впитывания, в виде:

$$g + \frac{(1-m)g}{m} - \frac{\alpha \mathcal{G}}{\rho m y} = 0, \quad (14)$$

где $\alpha = \rho \frac{gy}{k}$

Для определения точности выведенного выражения был проведен эксперимент. На рис.1 показано сравнение результатов аналитического решения и данных эксперимента.

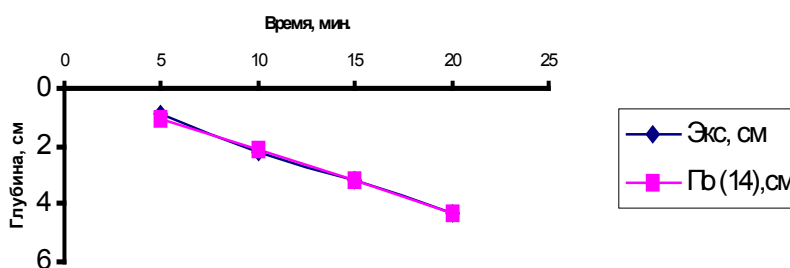


Рис. 1. Зависимость глубины промачивания при интенсивности дождя $\mathcal{G}_0 = 0,59$ мм/мин ($k=1 \cdot 10^{-5}$ м/сек, $m=0.28$)

Здесь такая же точность аппроксимации, как и в предыдущем случае, когда результаты получились из решения нелинейного уравнения (13) методом Рунге-Кутты. Сравнение показывает, что результаты отличаются только третьим знаком после запятой.

Отсюда следует, что влияние силы за счет изменения массы, в этом случае, почти не сказывается на результате, т.е. при моделировании можно пренебречь этой силой. Как видно из рис.1 уравнение (14) хорошо

согласуется с экспериментальными данными. Это свидетельствует о достоверности предложенной математической модели, при этом средняя относительная ошибка составила 5,82 %.

Данное решение справедливо тогда, когда осадки полностью просачиваются в грунт, т.е. для больших периодов времени, когда $g_0 \leq k$ (k – коэффициент фильтрации грунта).

Далее рассматривается случай, когда над поверхностью грунта образуется слой воды, т.е. когда $g_0 > k$. Предлагается два подхода моделирования процесса впитывания воды в грунт. Ниже приводятся две математические модели этого процесса: без учета и с учетом аналога архимедовой силы.

$$\frac{d g}{d t} = g - \frac{m g y}{k(H+m y)} g - g \frac{1}{\rho(H+m y)} \frac{d M}{d t} = 0, \quad (15)$$

где $M = \rho[H + m y]$; H – высота воды над поверхностью грунта.

Уравнение (15) соответствует инфильтрации воды в грунт без учета аналога силы Архимеда. С введением аналога силы Архимеда уравнение имеет вид:

$$g + \frac{(1-m) y g}{H+m y} - \frac{g y}{k(H+m y)} g - g \frac{1}{\rho(H+m y)} \frac{d M}{d t} = 0. \quad (16)$$

Для проверки достоверности уравнений (15) и (16), проведены эксперименты с песчаными образцами в лабораторных условиях с пористостью $m=0,32$; коэффициентом фильтрации $k=1,5 \cdot 10^{-4}$ м/сек; мощностью слоя воды над поверхностью грунта $H=6,5$ см.

В табл. 1 приведены данные экспериментов; вычисленные значения аналитическом решении уравнений (15 и 16), которые сопоставлены с данными П.Я. Полубариновой-Кочиной.

Таблица 1

Результаты эксперимента и аналитических решений

[Без учета аналога силы Архимеда и с учетом аналога силы Архимеда]

Глубина промачивания y (эксп.), см	Время промачивания t (эксп.), мин.	Время промачивания t , мин. (без учета аналога силы Архимеда) (15)	Время промачивания t , мин. (с учетом аналога силы Архимеда) (16)	Время промачивания t , мин. (по данным П.Я. Полубариновой – Кочиной)
20	1,45	2,16	4,26	4,27
30	4,20	4,11	7,08	7,07
40	6,30	6,36	10,07	10,06
50	9,10	9,21	13,18	13,17
60	11,25	11,41	16,36	16,25
70	14,05	14,14	19,19	19,19
80	17,00	17,31	22,46	22,46
90	19,05	20,18	26,17	26,27
100	21,55	23,11	29,09	29,08

В работе П.Я. Полубариновой-Кочиной аналитическое решение получено решением уравнения движения идеальной жидкости в пористой среде с учетом уравнения неразрывности, где наряду с H , учитывается еще h_k – капиллярное поднятие. В данной главе такое же решение получено с помощью модели переменной массы. При первой подаче воды в пористую среду, действие аналога архимедовой силы будет незначительным, так как тело как бы только начинается погружаться, а при следующих подачах воды в грунт действие аналога силы Архимеда ускоряет процесс промачивания. Уравнение с учетом аналога силы Архимеда устанавливает зависимость между положением фронта промачивания и временем.

Во многих работах процесс просачивания атмосферных осадков в пористую среду рассматривается без учета влагосостояния грунта, изменения пористости и интенсивности дождя – \mathcal{Q}_0 . Пористость грунта изменяется с изменением влажности по следующей формуле:

$$m^* = (1 - w)m, \quad (17)$$

где w – влажность в долях единицы; m – пористость в сухом состоянии грунта.

Для описания процесса насыщения атмосферных осадков в грунте, с учетом вышесказанных предположений, выведена модель переменной массы в виде

$$gM(t) + (1 - m^*)g\rho y - \frac{g\rho y}{k} \mathcal{Q} - \mathcal{Q} \frac{dM(t)}{dt} = 0, \quad (18)$$

где $M(t) = \rho \mathcal{Q}_0 t$ – масса воды, выпавшей в осадки за время t ; $\mathcal{Q} = m^* \frac{dy}{dt}$ – скорость впитывания.

Уравнение (18) определяет глубину промачивания с учетом интенсивности дождя и влагосостояния грунта.

Далее в главе рассматривался случай, когда глубина воды отлична от нуля, т.е. влияние на инфильтрацию глубины слоя воды. Слой воды – $H(t)$, является линейной функцией времени и определяется из уравнения баланса

$$H(t) = \mathcal{Q}_0 t - m^* y. \quad (19)$$

Таким образом, в зависимости от интенсивности осадков и типа грунта на поверхности земли может образоваться слой воды. При слабопроницаемом типе грунта и $\mathcal{Q}_0 > k$, образуется слой воды, высота которого определяется по формуле (19). В таких случаях вероятность возникновения селевых потоков становится очевидной. Если тип грунта сильно проницаемый и интенсивность осадков меньше, чем коэффициент фильтрации ($\mathcal{Q}_0 \leq k$), то выпавшее количество воды полностью просачивается в грунт. В таких случаях происходит подготовка и последующая активизация оползневого процесса.

В четвертой главе приводятся результаты исследований влияния интенсивности атмосферных осадков, механического состава грунтов,

влажностного состояния грунта и угла наклона склона на глубину промачивания покровных отложений оползнеопасных склонов.

В табл. 2 приведены основные водно-физические свойства модельных материалов.

Таблица 2

Водно-физические свойства образцов с различным процентным соотношением глины и песка

№ серии	Глинистый материал, % от веса	Песок, % от веса	Плотность, ρ , г/см ³	Пористость, в долях единицы	Влажность в долях единицы	Коэффициент фильтрации, м/сек
1	80	20	2,05	0,26	0,022	$1,8 \cdot 10^{-7}$
2	60	40	2,1	0,23	0,016	$5,3 \cdot 10^{-7}$
3	40	60	1,9	0,30	0,015	$8,5 \cdot 10^{-7}$
4	20	80	1,8	0,33	0,009	$1,15 \cdot 10^{-5}$

Для проведения экспериментов по промачиванию образцов были выбраны следующие интенсивности осадков: 1) $\mathcal{G}_0 = 0,3$ мм/мин; 2) $\mathcal{G}_0 = 0,44$ мм/мин. Данная интенсивность осадков принята, исходя из того, что повышенная опасность схода оползней возникает при ливневых осадках с интенсивностью близкой к этим величинам – 0,3 мм/мин.

На рис.2 приведены зависимости скорости просачивания воды от процентного содержания песчаных фракций при интенсивности $\mathcal{G}_0 = 0,3$ мм/мин и $\mathcal{G}_0 = 0,44$ мм/мин, которые аппроксимированы уравнением регрессии вида (20) и (20').

$$\text{Для } \mathcal{G}_0 = 0,3 \text{ мм/мин} \quad \mathcal{G} = 0,0051e^{0,042x}, \quad \eta = 0,9871 \quad (20)$$

$$\text{для } \mathcal{G}_0 = 0,44 \text{ мм/мин} \quad \mathcal{G} = 0,0064e^{0,0401x}, \quad \eta = 0,9826 \quad (20')$$

где \mathcal{G} – скорость промачивания (см/мин), x – процентное содержание песчаных фракций (%), η – корреляционное отношение

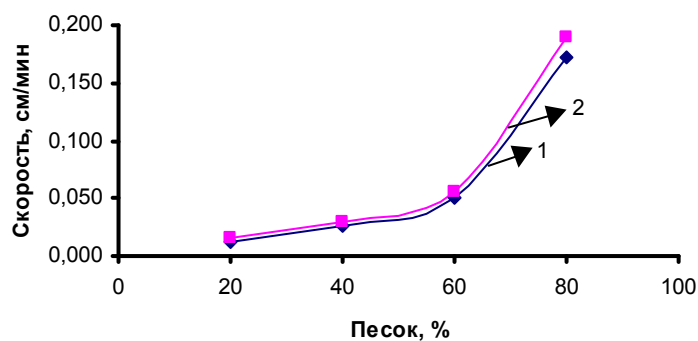


Рис. 2. Зависимости скорости просачивания воды от процентного содержания песчаных фракций (1 – $\mathcal{G}_0 = 0,3$ мм/мин; 2 – $\mathcal{G}_0 = 0,44$ мм/мин).

В результате экспериментов установлено, что скорость просачивания зависит от механического состава образцов: для серии №1-3 она возрастает в 1,2÷2 раза, а для серии №4 (20:80=г:п) скорость просачивания резко возрастает по отношению к серии №3 (40:60=г:п) в 5,6 раза. В сериях №1-3 при интенсивности $\mathcal{Q}_0 = 0,3$ мм/мин и $\mathcal{Q}_0 = 0,44$ мм/мин вода не успевала просачиваться в грунт и над поверхностью грунта образовывался слой воды. Это объясняется тем, что интенсивность осадков больше, чем коэффициент фильтрации образцов.

В этой главе рассмотрено влияние степени влагосостояния грунтов на процесс инфильтрации. Для определения глубины промачивания при различной влажности грунта с различным содержанием песчано-глинистых фракций были проведены эксперименты в лабораторных условиях. Результаты теоретических расчетов сравнивались с данными эксперимента и приведены в табл.3 (а, б) при различных влажностях грунтов.

Таблица 3

Результаты эксперимента и расчетные данные по (18) для образцов г:п=20:80 ($k=1,15 \cdot 10^{-5}$ м/сек; $m=0,33$) при интенсивности $\mathcal{Q}_0 = 0,3$ мм/мин

а)

 $w=0,08$

Время промачивания t , мин	Экспериментальная глубина промачивания y , см	Глубина промачивания по формуле (18) y , см	Глубина промачивания по (Полубариновой-Кочиной П.Я.)
10	1,9	1,94	1,75
20	3,8	3,87	3,51
30	5,75	5,81	5,27
40	7,65	7,74	7,03
45	8,65	8,71	7,90

б)

 $w=0,13$

Время промачивания t , мин	Экспериментальная глубина промачивания y , см	Глубина промачивания по формуле (18) y , см	Глубина промачивания по (Полубариновой-Кочиной П.Я.)
10	1,97	2,06	1,75
20	4,02	4,13	3,51
30	5,86	6,19	5,27
40	8,05	8,25	7,03
42	8,35	8,66	7,38

Как видно из табл. 3 (а, б) с увеличением влажности результаты (18) хорошо согласуются с экспериментальными данными, которые показывают значительную погрешность расчетов по формуле П.Я. Полубариновой-Кочиной. Средняя относительная погрешность составила 10,76%.

Количество воды в зависимости от плотности и пористости грунта расходуется на стекание по склону и на промачивание грунта по глубине y_1^* (искомая глубина промачивания). Для данного случая моделирование процесса промачивания грунтов с учетом наклона поверхности склона можно представить в виде уравнения баланса

$$\xi v_0 t \Delta x = \frac{y + y_1^*}{2} \Delta x m - \frac{my - (\Delta l \sin \alpha + y_1^* m)}{\Delta l} ktm \cos \alpha y_1^*, \quad (21)$$

где ξ представляет собой коэффициент, характеризующий количество инфильтрующейся воды в грунт ($0 \leq \xi \leq 1$); ϑ_0 – интенсивность осадков; t – время выпадения осадков; $\Delta x = \Delta l \cos \alpha$ – проекция длины участка склона; y – глубина промачивания грунта по горизонтальной поверхности; m – пористость грунта; k – коэффициент фильтрации; α – угол наклона склона; $(my - (\Delta l \sin \alpha + y_1^* m))$ – разница высот; Δl – длина участка склона или пройденное расстояние.

Для выяснения достоверности уравнения баланса воды (21), в лабораторных условиях был проведен эксперимент по промачиванию образца по глубине при различных углах наклона поверхности. Данные приведены в табл. 4 и табл. 5.

Таблица 4

Водно-физические свойства покровных суглинков не нарушенного строения (с. Чон-Арык)

№ п/п.	Плотность, г/см ³	Плотность частиц, г/см ³	Плотность скелета, г/см ³	Природная влажность, %	Пористость, %	Коэфф. филь-ии, м/сек
1	1,42	2,71	1,27	11,47	53	$8,3 \cdot 10^{-7}$
2	1,46	2,71	1,31		52	$5,9 \cdot 10^{-7}$
3	1,56	2,71	1,40		48	$5,4 \cdot 10^{-7}$

Таблица 5

Водно-физические свойства покровных суглинков искусственного строения

№ п/п.	Плотность, г/см ³	Плотность частиц, г/см ³	Плотность скелета, г/см ³	Природная влажность, %	Пористость, %	Коэфф. филь-ии, м/сек
1	1,63	2,71	1,48	10	45	$4,8 \cdot 10^{-7}$
2	1,58	2,71	1,46	8	46	$5 \cdot 10^{-7}$
3	1,62	2,71	1,46	11	46	$5,2 \cdot 10^{-7}$

На рис. 3 в качестве примеров представлены результаты экспериментов и расчетов для угла наклона склона 10° и 30° .

На рис. 4 представлена зависимость глубины промачивания от угла наклона склона при интенсивности $\mathcal{Q}_0 = 0,25$ мм/мин за $t=120$ мин.

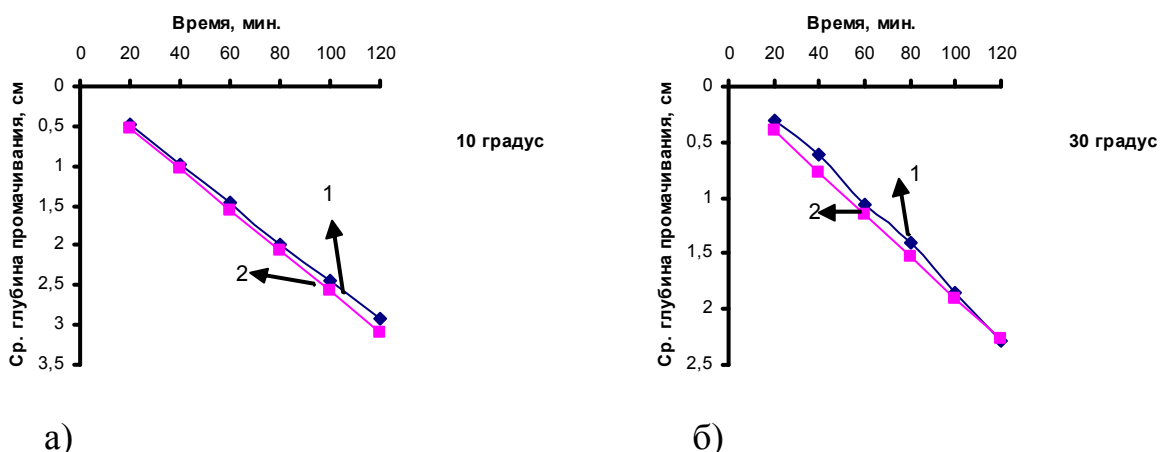


Рис. 3. Зависимость глубины промачивания грунта от времени при различном угле наклона

- а) 1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные (10°)
 б) 1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные (30°)

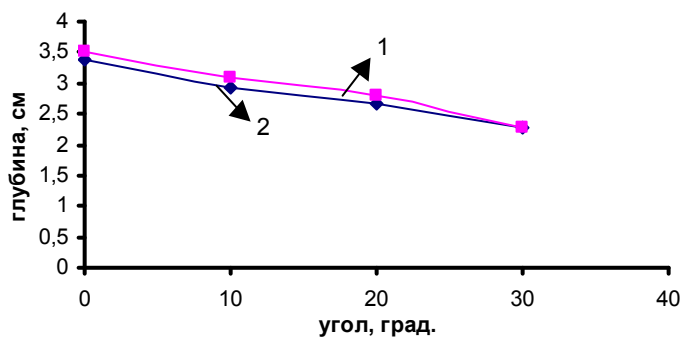


Рис. 4. Зависимость глубины промачивания грунтов от угла поверхности склона

1 – расчетные; 2 – экспериментальные

В результате экспериментов установлено, что водопроницаемость склонов с углами наклона 10° , 20° и 30° соответственно в 1,15; 1,26 и 1,49 раза меньше чем, водопроницаемость склонов с горизонтальной поверхностью. При углах наклона 10° - 30° и интенсивности $\mathcal{Q}_0 = 0,25$ мм/мин вода полностью не проходит в грунт и часть ее из общего расхода (144 мл) уходила в сток. С увеличением угла наклона склона глубина промачивания уменьшается, а количество стекающей воды увеличивается. Относительная погрешность

экспериментальных данных с расчетными значениями глубины промачивания по уравнению (21) не превышает 8,5 %.

В связи с продолжительными дождями в весенний период 2002 года, на склонах предгорных долин в окрестности г. Бишкек произошли многочисленные поверхностные оползни типа оплывин и сплывов.

В качестве объекта исследования был взят участок северного склона горы Боз-Болток (с.Чон-Арык), где оползень перекрыл дорогу для проезда транспорта. Участок представляет собой склон крутизной до 20° - 26° , тело оползня сложено супесчано-суглинистым грунтом с включением гальки и гравия. В результате смещения образовалась стенка срыва, высотой 2 – 2,5 м. Объем оползневых масс составил около $2041,18 \text{ м}^3$.

Построена поверхность скольжения по данным маркшейдерских съемок и определена глубина промачивания по расчетам предложенной в работе математической модели при интенсивности осадков $\mathcal{I}_0 = 0,3 \text{ мм/мин}$ и угле наклонного склона $\alpha = 25^{\circ}$ (рис. 5).

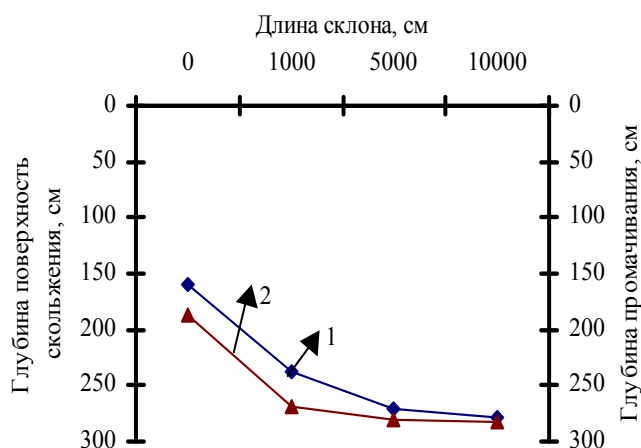


Рис. 5. Построение поверхности скольжения и определение глубины промачивания

- 1 – поверхность скольжения, по данным расчетов устойчивости;
2 – расчетная глубина промачивания по уравнению (21)

Погрешность расчетной поверхности скольжения и расчетной глубины промачивания склона составила 9%. Поэтому, результаты позволяют сделать вывод о достоверности моделирования и предварительно оценивать по определяемой глубине промачивания фактическую поверхность скольжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке математической модели, учитывающей влияние интенсивности дождя, влагосостояния грунта, механического состава грунтов на процессы инфильтрации покровных отложений оползнеопасных склонов, а

также в установлении влияния механического состава грунтов и угла наклона склона на процессы инфильтрации.

Основные результаты и выводы работы сводятся к следующему:

1. Предложен новый подход к математическому моделированию процесса инфильтрации атмосферных осадков в пористую среду, основанный на модели переменной массы с учетом введения новой силы-силы аналога Архимеда.

2. Обосновано применение математической модели для процесса промачивания водой покровных отложений оползнеопасных склонов с учетом интенсивности дождя и изменения их пористости от влагосостояния.

3. Разработаны методики определения глубины, и скорости промачивания в зависимости от времени при различной интенсивности осадков, от процентного содержания глинистых и песчаных фракций, и от времени при различном угле наклона поверхности склона.

4. Установлено, что при интенсивности осадков больше, чем коэффициент фильтрации ($\mathcal{G}_0 > k$), вероятность возникновения оползневых процессов становится ничтожной, а образование селевых потоков становится очевидным. Если тип грунта сильно проницаемый и интенсивность осадков меньше, чем коэффициент фильтрации ($\mathcal{G}_0 \leq k$), то выпавшее количество воды полностью просачивается в грунт. В таких случаях происходит подготовка и последующая активизация оползневого процесса, приводящего к катастрофическому событию.

5. Получено уравнение баланса воды, учитывающее влияние угла наклона склона на глубину промачивания. С увеличением угла наклона склона глубина промачивания уменьшается.

6. Построена расчетная поверхность скольжения северного склона горы Боз-Болток (с. Чон-Арык) и определена глубина промачивания по расчетам предложенной в работе математической модели при интенсивности осадков $\mathcal{G}_0 = 0,3$ мм/мин и угле наклона склона $\alpha = 250$. Средняя относительная погрешность расчетной поверхности скольжения и расчетной глубины промачивания склона составила 9%.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Новый подход к моделированию впитывания фильтрующейся жидкости в пористую среду // Вестник Кыргызского Национального Университета имени Ж. Баласагына. – Вып.3 (1-3). – Бишкек, 2002. – С. 32-35 (соавтор М.Дж. Джаманбаев).

2. Аналитические решение задачи насыщения водой системы «почва-грунт» // Экологические проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов гор Тянь-Шаня / Сборник научных докл. междунар. науч.-практич. конф., посвящ. Международному году гор, 5-6 июня. – Бишкек, 2002. – С. 209-213 (соавтор Джаманбаев М. Дж.).

3. Моделирование влияния интенсивности атмосферных осадков на образование оползней // Наука и новые технологии. – Бишкек, 2003. – №3. – С. 32-38 (соавторы: Кожогулов К.Ч., Джаманбаев М.Дж.).

4. Анализ природных факторов формирования оползня «Мырза» в Узгенском районе Ошской области // Недра гор Кыргызстана – народу. – Бишкек, 2003. – С. 88-94 (соавторы: Кожогулов К.Ч., Никольская О.В., Орозокулов А.М.).

5. Математическое моделирование процесса насыщения грунтов атмосферными осадками // Недра гор Кыргызстана – народу. – Бишкек, 2003. – С. 100-106 (соавтор Джаманбаев М.Дж.).

6. Влияние влажности и гранулометрического состава грунтовых пород на инфильтрацию атмосферных осадков // Образование через науку / Материалы научн.-техническ. симпозиума, том 1. – Бишкек, 2004. – С. 125-129 (соавтор Джаманбаев М.Дж.).

7. Моделирование инфильтрационных процессов при оценке оползневой опасности // Известия Кыргызского Технического Университета им. И. Раззакова. – Бишкек, 2004. – №6. – С. 51-55 (соавтор Джаманбаев М.Дж.).

8. Моделирование влияния влажности на образование оползней // Известия Кыргызского Технического Университета им. И. Раззакова. – Бишкек, 2004. – №6. – С. 75-78.

9. Влияние механического состава породы и интенсивности атмосферных осадков на глубину и скорость промачивания // Проблемы прикладной математики, механики и инженерного образования / Материалы республиканской научно-методической конференции, посвящ. 50-летию КНТУ им. И. Раззакова и 75-летию профессора Усубакунова Р.У. – Бишкек, 2005. – С. 90-94 (соавторы Джаманбаев М.Дж., Фалалеев Г.Н.).

10. Моделирование процесса инфильтрации атмосферных осадков в покровные отложения // Вестник Казахского Национального Технического Университета имени К.И. Сатпаева. – Алматы, 2005. – 3(47). – С. 12-16 (соавтор Джаманбаев М.Дж.).

11. Сравнительная оценка лабораторных и полевых экспериментов по инфильтрации атмосферных осадков // Вестник Кыргызско-Российского Славянского Университета. – Бишкек, 2006. Том 6, №7. – С. 19-22. (соавторы Кожогулов К.Ч., Джаманбаев М.Дж., Барбат Ю.П., Фалалеев Г.Н.).

РЕЗЮМЕ

Омуралиев Сагындык Бекишевич Жер көчкүнүн коркунучтуу беткейине жаан-чачындын жерге сиңүү процессин моделдөө

Төмөндөгү: 25.00.20 – «Геомеханика, тектердин жардырууда талкаланышы, рудникалык аэрогазодинамика жана тоо теплофизика» жана 01.02.05 – «Суюктуктун, газдын жана плазманын механикасы» адистиктери боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты деген илимий даражаны алуу үчүн жазылган диссертация.

Ачкыч сөздөр: суу-физикалык касиеттери, физика-механикалык касиеттери, атмосфералык жаан-чачын, топуракка суунун сиңиши, сиңүү тереңдиги, сиңүү ылдамдыгы, чопо сыяктуу топурактардын механикалык составы, жамгырдын интенсивдүүлүгү, грунттун нымдуулугу, чыпкалануу, жаан-чачындын жерге сиңүүсү, тектердин эңкейиш бурчтары.

Бул иште жер үстүндөгү жер көчкүлөрдүн пайда болушуна жаан-чачындын жерге сиңүүсүнүн таасир этишинин үлгүлөштөрүүсү каралган.

Суунун майда тешиктүү чөйрөгө сиңүү процессинин математикалык үлгүсүн түзүүнүн жаңы мамилеси сунушталат, ал киргизилген жаңы күчтү – Архимеддин аналогунун күчүн эсепке алуу менен өзгөрүлмө массанын үлгүсүнө негизделген. Чыныгы абалда бул күч суунун топуракка сиңүү күчүн мүнөздөйт.

Тектердин эңкейиш бурчтары сиңүү тереңдигине таасир этишине, суу балансынын теңдемеси жазылган.

Сиңүү ылдамдыгы, нуска чопо сыяктуу топурактын механикалык составынан эмпирикалык көз карандылыгы аныкталган.

РЕЗЮМЕ

Омуралиев Сагындык Бекишевич Моделирование процесса инфильтрации жидкости в грунтах оползнеопасных склонов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 25.00.20. – «Геомеханика, разрушение горных пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и рудничная теплофизика» и 01.02.05. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Ключевые слова: водно-физические свойства, физико-механические свойства, атмосферные осадки, просачивание воды в грунт, глубина промачивания, скорость промачивания, механический состав суглинистых грунтов, интенсивность дождя, влажность грунта, фильтрация, инфильтрация, угол наклона склона.

В диссертационной работе рассматриваются условия образования поверхностных оползней под влиянием инфильтрации атмосферных осадков.

Предложен новый подход к математическому моделированию процесса инфильтрации воды в пористую среду, основанный на модели переменной массы с учетом введенной новой силы-силы аналога Архимеда. В реальном случае эта сила характеризует всасывание воды в почву.

Получено уравнение баланса воды, учитывающее влияние угла наклона склона на глубину промачивания.

Для проверки достоверности математической модели проведены эксперименты в лабораторных условиях.

Установлены эмпирические зависимости скорости промачивания от механического состава образцов суглинистого грунта.

RESUME**OMURALIEV SAGYNDYK BEKISHEVICH**
Modelling process liquid infiltration in landslide-hazard soil slopes

Dissertation for academic degree competition of the candidate of physico-mathematical sciences on specialities 25.00.20. – “Geomechanics, rock failure by explosion, mine air gas-dynamics and mine thermal physics” and 01.02.05. – “Mechanics of fluids, gas and plasma”.

Key words: water-physical properties, physical & mechanical properties, atmospheric precipitation, water infiltration into soil, depth of penetration, speed of penetration, texture of loamy soils, rainfall intensity, soil dampness, filtration, slope angle infiltration.

Dissertation includes triggering conditions of shallow landslide initiation due to atmospheric precipitation infiltration.

The new approach of mathematical process simulation of water infiltration into porous medium based on variable mass model if the Archimedes new force-force analogue is included. In practice, this force describes water absorption into soil.

The new equation of water balance including slope angle affecting penetration depth is found.

To test mathematical model reliability the laboratory research was carried.

Penetration depth empirical dependences on loamy soil texture samples are determined.