

УДК 519.63

**АСПЕКТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДВИЖЕНИЯ ВОДНЫХ ПОТОКОВ ПРИ ПРОРЫВЕ ПЛОТИН****Стриганова М.Ю., Самедов С.А.о.**

Проведен анализ существующих исследований движения водных потоков в различных плоскостях, и в том числе потоков при прорыве подпорных сооружений. Изложены основные особенности гидродинамической опасности Тахтакорпюнского водохранилища и земляной плотины, возведенной для его создания. Определены цели и задачи по изучению распространения волн по нижнему бьефу выбранного сооружения при гидродинамической аварии.

*Ключевые слова:* волна прорыва, гидродинамическая авария, нижний бьеф, математическая модель.

(Поступила в редакцию 9 октября 2018 г.)

**Введение.** В связи с потенциальной угрозой возникновения крупных аварий и техногенных чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях (ГТС) вопросы обеспечения их безопасности являются актуальными для всех стран мира. Гидродинамические аварии могут произойти по причинам сильных проливных дождей (ливней) или же после резкого таяния снега, обильно выпавшего во время зимнего периода; сильных ветров, в результате которых волны водных бассейнов обрушиваются на прибрежную полосу; возникновения вулканов, приливов, а также в результате подземных толчков, возникших разломов и трещин на земной поверхности; по вине человека.

Затопление территории приводит не только к огромным материальным потерям, изменению местной геоэкологической обстановки, перебоям в водо- и энергоснабжении населенных пунктов, но и к человеческим жертвам. Строительство высотных плотин и создание высокогорных водоемов усиливают эту опасность, т. к. возникающие прорывные потоки водонасыщенной грунтовой массы, составляющей тело плотины, распространяются вниз по течению и обладают катастрофической мощностью.

Минимизация последствий аварийных ситуаций на ГТС во многом становится возможной при оперативном принятии решений в условиях быстрого изменения окружающей обстановки, основанного на знании характера развития чрезвычайных ситуаций и их последствий (скорости распространения волн, времени начала и продолжительности затопления, глубине и площади затопления территории).

**Основная часть.** Водную безопасность Азербайджана обеспечивает реализация проектов по созданию новых водохранилищ и строительству каналов. В стране уделяется постоянное внимание этим вопросам, т. к. основные источники воды, питающие страну, формируются за пределами Азербайджана.

Для обеспечения дополнительными водными ресурсами были построены и сданы в эксплуатацию в 2013 г. Тахтакорпюнское водохранилище (рис. 1), гидростанция и каналы Вельвелечай-Тахтакорпю и Тахтакорпю-Джейранбатан. Новое гидротехническое сооружение водохранилище Тахтакорпю построено в Шабранском районе Азербайджана. Его площадь составляет 8,71 км<sup>2</sup>, общее водоизмещение сооружения – 270 млн м<sup>3</sup>, полезный объем воды в озере равен 238,4 млн м<sup>3</sup>. Поступающая в водохранилище вода является источником для выработки электроэнергии, подачи на питьевые и технические нужды, а также орошения прилегающих территорий сельскохозяйственных предприятий и небольших поселков. Из водохранилища Тахтакорпю вода по каналу Тахтакорпю-Джейранбатан поступает в озеро Джейранбатан. Водохранилище создано земляной плотинной с глиняным ядром. Высота плотины составляет 142,5 м. Это одна из самых высоких земляных плотин не только в регионе, но и за пределами страны. Опасность последствий возникновения возможной аварии обусловлено тем, что данное сооружение находится на высоте около 140 м над простирающейся долиной, по которой проходят международная автотрасса, железная дорога, трасса водопровода, линия электропередач и размещены населенные пункты Шабран и Савран. При прорыве плотины возможно затопление долины с расположенными зданиями и сооружениями, полное нарушение энергоснабжения, водоснабжения, транспортного сообщения.

Учитывая погодные условия и рельеф Шабранского района, вероятность разлива водохранилища «Тахтакорпю» и последующее затопление прилегающей области возможны по причине возникновения подземных толчков, возникших разломов и трещин на земной поверхности, техногенных катастроф и диверсионных действий.



Рисунок 1. – Тахтакорпюнское водохранилище

В мировой практике эксплуатации плотин в сейсмических районах известны случаи нарушения целостности плотин, ухудшения свойств их конструктивных составляющих при возникновении землетрясений (табл. 1) [1]. Опасность разрушения грунтовых плотин при воздействии таких явлений по сравнению с бетонными возрастает. Образование трещин в теле плотины способствует ее достаточно быстрому размыву.

Таблица 1. – Плотины, испытавшие сейсмическое воздействие

Название плотины, страна	Объем водохранилища, км <sup>3</sup>	Высота, м
Койна, Индия	2,78	103
Кариба, Замбия	175	128
Кремаста, Греция	4,75	120
Мид, США	35	142
Талбинго, Австралия	0,935	162
Хендрик-Фервурд, Южная Африка	374	90
Вайонт, Италия	150 млн	266
Монтэнар, Франция	275 млн	130
Гран-Валь, Франция	292 млн	78
Нурекская ГЭС, Таджикистан	11	250 (300)
Куробе, Япония	149 млн	180
Уэд-Фодда, Алжир	225 млн	89
Бенмор, Нов. Зеландия	2,04	96

Исследование прорывных потоков на реальных объектах провести практически невозможно. Имитация прорыва подпорного фронта гидротехнического сооружения, например, при максимальном открытии отверстий водосбросных сооружений может сопровождаться реальным затоплением местности. Поэтому для изучения характеристик таких потоков возможно только моделирование и лабораторный эксперимент.

В настоящее время развитие возможностей вычислительной техники и появление мощных математических пакетов программ позволяет осуществлять математическое моделирование различной сложности. Моделированию движения водных потоков, и в частности потоков при прорыве подпорных сооружений, посвящено большое количество исследовательских работ.

Метод, предлагаемый большим количеством авторов (Н.М. Борисова, А.В. Гусев, В.В. Остапенко, J. Wang, H. Ni, Y. He, F. Alcrudo, F. Benkhaldoun, G. Colicchio, A. Colagrossi, M. Greco, M. Landrini и др.), позволяет в рамках первого приближения теории мелкой воды смоделировать процесс распространения прерывных волн по сухому руслу. Исследователи рассматривают течение воды, которое возникает при разрушении плотины в прямоугольном канале с горизонтальным дном и сухим русом в нижнем бьефе, как волновое. Основу данного метода составляет модифицированный закон сохранения полного импульса, учитывающий сосредоточенные потери импульса, обусловленные образованием

локальных турбулентно-вихревых структур в поверхностном слое жидкости по фронту прерывной волны.

В исследованиях [2] при помощи эвристического метода, в основе которого лежит согласование с результатами лабораторных экспериментов, предложена модификация закона сохранения полного импульса, допускающая в рамках уравнения мелкой воды распространение прерывных волн по сухому руслу. Приведены результаты численного моделирования процесса формирования, распространения и трансформации прерывной волны, возникающей в результате полного или частичного разрушения плотины в русле с горизонтальным и наклонным дном, а также дном, имеющим локальное препятствие в нижнем бьефе.

Применительно к моделям теории мелкой воды и течений потоков по наклонным поверхностям развит и реализован один из вариантов метода частиц, состоящий в адаптации формы частиц на каждом шаге по времени с целью выполнения условия слабой аппроксимации исходного решения. Для численного моделирования движения оползня-потока, аналогичного течению жидкости в открытых каналах, используется вариант метода частиц [3–5]. Модель движения грунтового потока основана на гидравлическом подходе. Это означает, что продольный масштаб изучаемого явления должен быть много больше глубины потока и что берутся средние по поперечному сечению параметры потока. Он рассматривается как тонкий, однородный слой несжимаемой жидкости, для которого плотность, коэффициенты гидравлического и сухого трения не изменяются [6–11]. Считается, что в начальный момент смещающаяся часть массива мгновенно дробится и превращается в жидкость, которая затем стекает по склону. Склон рассматривается как поверхность с переменной крутизной, имеющей значительные длину и ширину. На частицы потока действуют силы тяжести и силы трения. Новое решение задачи для наклонных каналов получено после перехода в систему координат, движущуюся с ускорением. Анализ решений показывает, что уравнения мелкой воды при течении потока над ровным дном (в горизонтальных и наклонных каналах) с учетом трения на дне или без трения позволяют получить скорость потока. Она описывается линейным уравнением, а высота потока – квадратичным уравнением. Дана постановка и приведены результаты вычислительных экспериментов для теории мелкой воды (задача о разрушении плотины, задача о распространении бора, об отражении бора от твердой стенки, задача о гидравлическом прыжке). Проведен сравнительный анализ с численным решением задачи о прорыве плотины, полученным с помощью конечно-разностных методов.

Для расчета параметров аварийного разлива и распространения волны прорыва по сухому руслу применена методика [12], использующая метод частиц. К достоинствам этого метода относится достаточно простая физическая интерпретация, обеспечение строгого соблюдения закона сохранения массы по своему построению. Данный метод позволяет прозрачно контролировать баланс импульса. Параметры волны прорыва определяются с помощью математической модели, позволяющей обеспечить достаточную достоверность расчетов в конкретных условиях решаемой задачи. Расчеты выполнялись на примере нескольких объектов. Для описания рассматриваемого процесса использовалась математическая модель, основанная на известных уравнениях Сен-Венана.

В работах В.В. Чуруксаевой и других авторов [13] по результатам исследований сформулирована математическая модель стационарного турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости в открытом русле. Для построения математической модели использованы осредненные по глубине уравнения Рейнольдса для вязкой жидкости в гидростатическом приближении с учетом незначительных изменений основных характеристик потока по глубине. Горизонтальные размеры значительно превышают глубину потока. Турбулентное замыкание уравнений гидродинамики проводится с помощью соответствующей модификации двухпараметрической модели турбулентности с замыкающими соотношениями Буссинеска. Математическая модель дополняется уравнением конвекции-диффузии для моделирования переноса пассивной примеси.

Н.Г. Панченко и другими авторами [14] рассмотрены особенности моделирования открытых бурных двумерных в плане стационарных водных потоков. Методы решения граничных задач для таких потоков разбиты по группам: аналитические в физической области течения потока; основанные на методе характеристик; численные; аналитико-численные; аналитические, использующие промежуточную плоскость годографа скорости; эмпирические, позволяющие для определения некоторых параметров движущегося потока, использовать обработанные полученные результаты многочисленных экспериментов.

Целью исследований в работе Папченко Н.Г. являлось создание общей схемы решения задачи по определению параметров потока, вывод основных дифференциальных и интегральных уравнений. Рассматривались два вида водных потоков: первый с допущением отсутствия сил сопротивления потоку; второй – с учетом этих сил. Определено, что решение задачи в плоскости годографа скорости является первичной при решении общей задачи. Выявлен характер изменения параметров потока и порядок расчета большого количества задач по свободному растеканию водного потока. Разработанные алгоритмы и программы позволяют получить информацию о всех основных параметрах потока: траектории растекания потока; глубинах и скоростях потока в любой выбранной точке.

Исследования свободного растекания бурного потока в широкое отводящее русло за водопропускными трубами, работающими в безнапорном режиме [15], проводились на модели для которой с допущениями: поток открытый, бурный, двухмерный в плане, стационарный; поток имеет продольную ось симметрии в плане течения; дно отводящего русла плоское, горизонтальное; силы сопротивления потоку не учитываются; движение потока потенциальное.

Получена система уравнений движения потока в плоскости годографа скорости. Установлена закономерность изменения глубины: вдоль расширяющейся струйки бурного потока скорости возрастают, глубины уменьшаются, а характер растекания всего потока справедлив вдоль произвольной линии тока как на границе, так и внутри потока.

Методы математического моделирования были применены для решения задач расчета динамики прохождения прорывных паводков по долинам рек [16]. Для достижения целей данной работы были использованы двумерные математические модели, основанные на реализации численных методов решения системы уравнений Сен-Венана. Отличием программного комплекса FLO-2D является наличие селевого блока, позволяющего рассчитывать параметры движения селевого потока на основе уравнений движения неньютоновских жидкостей.

Кроме математического и гидродинамического моделирования движения потоков был проведен ряд экспериментальных исследований.

Поток, движущийся по сухому руслу может возникнуть в результате аварии на плотине, возникшей в результате смещения горных пород по склону и перекрывших горную реку. Опасность представляет не только сам водный поток, но и обломки пород, увлекаемые им. Известны лабораторные экспериментальные исследования такого потока [17–19]. Самой разрушающей является волна, возникающая на переднем участке потока. Волна имеет крутой фронт, ее часто называют «стеной воды». В передней части волны формируется горизонтальный вихрь диаметром порядка амплитуды волны. У дна возникает плотная упаковка вихревых диполей диаметром порядка размера донных частиц. Центральная часть диполей поднимается вверх с захваченным гравием, скручивается с большим вихрем, образуя жгут. Центральная часть жгута поднимается вверх, формируя стену из воды, грунта и обломков пород.

В экспериментальной установке объем воды использовался в значительно уменьшенном объеме в сравнении с реальными условиями, поэтому в горизонтальном канале вихри быстро теряли грунт после опускания центральной части жгута. В натуральных условиях при больших расходах воды и на крутых горных склонах такая стена из воды с грунтом возникает неоднократно в головной части волны, нанося огромный ущерб на пути движения.

А.В. Чеботниковым получены результаты экспериментальных исследований на моделях по определению параметров волн, возникающих в верхнем и нижнем бьефах при частичном разрушении гидротехнических сооружений [20]. Рассмотрены различные варианты возникновения и протекания процессов аварийных ситуаций и предложены методы расчета параметров волны прорыва. Показано, что через достаточно короткий интервал времени после начала истечения его можно отнести к квазистационарному течению, что позволяет рассматривать истечение через проран в плотине, как истечение через водослив и определять расход переливающейся воды по соответствующим уравнениям.

**Выводы.** Проведенные различными авторами исследования указывают на соотношение между характером движения, уклоном, скоростью и глубиной потока – с увеличением уклона, скорости и уменьшением глубины течение становится бурным; с уменьшением уклона, скорости и увеличением глубины течение приобретает спокойный характер. При выходе на равнину скорость потока резко уменьшается, он распадается на многочисленные участки, движущиеся в виде веера.

Для прогнозирования последствий возможной чрезвычайной ситуации на плотине Тахтакорпунского водохранилища необходимо смоделировать движение прорывного потока по наклонной плоскости и перемещение в горизонтальной плоскости исходя из особенностей данной местности в нижнем бьефе. Существующие методы исследований рассматривают особенности движения таких потоков по отдельности в разных плоскостях.

Конечной целью научных исследований ставится оценка последствий гидродинамической аварии. Для ее реализации необходимо решить задачи по определению особенностей сооружения, оценке основных параметров прорывного потока, предполагаемых зон затопления для заблаговременной разработки мер по предупреждению, ликвидации чрезвычайной ситуации и уменьшению ущерба.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гупта, Х.К. Плотины и землетрясения / Х. К. Гупта, Б. Растоги. – М.: Мир, 1979. – 251 с.
2. Есиркенов, С.Р. Численное моделирование течений жидкости с прерывными волнами / С.Р. Есиркенов, А.К. Каримов // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2017. – Т. 100, – № 1. – С. 228–234.
3. Мекенбаев, Б.Т. Автомодельное решение динамики гравитационных потоков в наклонных каналах / Б.Т. Мекенбаев, Ч.Т. Дуйшеналиев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 3 (35). – С. 59–71.
4. Mangeney, A. Analytical Solution for Testing Debris Avalanche Numerical Models / A. Mangeney, P. Heinrich, R. Roche // PAGEOPH. – 2000. – Vol. 157. – P. 1081–1096.
5. Zahibo, N. The Savage-Hutter model for theavalanche dynamics in inclined channels: analytical solutions / N. Zahibo, E. Pelinovsky, T. Talipova, I. Nikolkina // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol. 115. B03402. DOI: 10.1029/2009JB006515
6. Стокер, Дж. Волны на воде. Математическая теория и приложения / Дж. Стокер. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1959. – 617 с.
7. Эглит, М.Э. Неустановившиеся движения в руслах и на склонах / М.Э. Эглит. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. – 96 с.
8. Богомолов, С.В. Моделирование волн на мелкой воде методом частиц / С.В. Богомолов, Е.В. Захаров, С.В. Зеркаль // Математическое моделирование. – 2002. – Т. 14, № 3. – С. 103–116.
9. Burguete, J. An Upwind Conservative Treatment of Source Terms in Shallow Water Equations / J. Burguete, P.G. Navarro // CD-ROM Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering «ECCOMAS 2000». – Barcelona, 11–14 September 2000. – 17 p.
10. Зеркаль, С.В. Апостериорная оценка погрешности метода частиц на моделях теории мелкой воды / С.В. Зеркаль // 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.
11. Brooks, G.R. The Lemieux Landslide of June 20, 1993, South Nation Valley, Southeastern Ontario / G.R. Brooks, J.M. Aylsworth, S.G. Evans, D.E. Lawrence. – Geological Survey of Canada, Ottawa, Ontario, 1994. – 18 p.
12. Кушнерева, О.Н. Расчет гидродинамических процессов при разрушении водоподпорных грунтовых сооружений и ледовых образований: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.16 / О.Н. Кушнерева; Учреждение НГАСУ (Сибстрин). – Новосибирск, 2012. – 18 с.
13. Чуруксаева, В.В. Численное исследование турбулентных течений в открытых каналах и руслах на основе модели мелкой воды: дис. ...канд. физ.-мат.наук: 01.02.05 / В.В. Чуруксаева. – Томск, 2016. – 159 л.
14. Папченко, Н.Г. Моделирование потенциального течения двухмерных бурных водных потоков: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Н.Г. Папченко. – п. Персиановский, 2014. – 146 л.
15. Дуванская, Е.В. Граничная задача свободного растекания бурного потока и ее общее решение / Е.В. Дуванская // Природообустройство. – 2012. – № 2. – С. 73–77.
16. Кидяева, В.М. Оценка потенциальной опасности при прорывах горных озер: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.27/ В.М. Кидяева. – М., 2014. – 195 л.
17. Ancey, S. Debris Flows and Related Phenomena. In «Geomorphological Fluid Mechanics» / S. Ancey. – Ed. N.J. Balmforth and A. Provenzale. – Berlin: Springer, 2001. – P. 528.
18. Мельникова, О.Н. Динамика руслового потока: учеб. пособие / О.Н. Мельникова. – М.: МАКС Пресс, 2006. – 139 с.
19. Мельникова, О.Н. Захват гравия головной волной, возникающей при прорыве плотины в сухом русле / О.Н. Мельникова // Известия Российской академии наук. Сер. Физическая. – 2008. – Т. 72, № 12. – С. 1793–1796.

20. Чеботников, А.В. Экспериментальное изучение волн перемещения, образующихся при частичном разрушении плотины: дис.... канд. техн. наук: 05.23.16 / А.В.Чеботников; Учреждение НГАСУ (Сибстрин). – Новосибирск, 2008. – 143 л.

## ASPECTS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE MOVEMENT OF WATER FLOWS DURING A BREAK OF DAMS

**Marina Striganova**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

The state educational establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

**Samedagha Samedov**

Ministry of Emergency Situations of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

*Purpose.* Examine and evaluate existing studies of the movement of water flows during hydrodynamic accidents, identify criteria and parameters for comparison, and determine the direction of research taking into account the characteristics of the Takhtakorpunsky reservoir.

*Methods.* Systems approach, comparative analysis, review, generalization of the main points of view, review of existing approaches.

*Findings.* The analysis of existing studies of the movement of water flows in various planes in general, including flows at the breakout of retaining structures, is given. The causes and consequences of a possible emergency situation on the object selected for investigation are determined.

*Application field of research.* The research results can be used to calculate the engineering situation and predict the consequences of the accident at Takhtakorpunsky reservoir and similar objects.

*Conclusions.* For the selected object, it is necessary to simulate jointly the movement of the breakthrough flow on an inclined plane and movement in the horizontal plane, taking into account the particular features of the downstream and possible consequences of a hydrodynamic accident.

*Keywords:* breakthrough wave, hydrodynamic accident, downstream, mathematical model.

(The date of submitting: October 9, 2018)

### REFERENCES

1. Gupta Kh.K., Rastogi B. *Plotiny i zemletryaseniya* [Dams and earthquakes]. Moscow: Mir, 1979. 251 p. (rus)
2. Esirkenov S.R., Karimov A.K. Chislennoe modelirovanie techeniy zhidkosti s preryvnymi volnami [Numerical simulation of fluid flow with discontinuous waves]. *Vestnik Kazakhskoy akademii transporta i kommunikatsiy im. M. Tynyshpaeva*, 2017. Vol. 100. No. 1. Pp. 228–234. (rus)
3. Mekenbaev B.T., Duyshenaliev Ch.T. Avtomodel'noe reshenie dinamiki gravitatsionnykh potokov v naklonnykh kanalakh [Automobile solution of the dynamics of gravitational flows in inclined channels]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*, 2016. No. 3 (35). Pp. 59–71. (rus)
4. Mangeney A., Heinrich P., Roche R. Analytical Solution for Testing Debris Avalanche Numerical Models. *PAGEOPH*, 2000. Vol. 157. Pp. 1081–1096.
5. Zahibo N., Pelinovsky E., Talipova T., Nikolkina I. The Savage-Hutter model for the avalanche dynamics in inclined channels: analytical solutions. *J. Geophys. Res.*, 2010. Vol. 115. B03402. DOI: 10.1029/2009JB006515
6. Stoker Dzh. *Volny na vode. Matematicheskaya teoriya i prilozheniya* [Waves in the water. Mathematical theory and applications]. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1959. 617 p. (rus)
7. Eglit M.E. *Neustanovivshiesya dvizheniya v ruslakh i na sklonakh* [Unsteady movements in the beds and on the slopes]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1986. 96 p. (rus)
8. Bogomolov S.V., Zakharov E.V., Zerkal' S.V. Modelirovanie voln na melkoy vode metodom chastits [Modeling of waves on shallow water by the particle method]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2002. Vol. 14. No. 3. Pp. 103–116. (rus)
9. Burguete J., Navarro P.G. An Upwind Conservative Treatment of Source Terms in Shallow Water Equations. *CD-ROM Proceedings of European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering «ECCOMAS 2000»*. Barcelona, September 11–14, 2000. 17 p.
10. Zerkal' S.V. Aposteriori otsenka pogreshnosti metoda chastits na modelyakh teorii melkoy vody [A posteriori estimation of the error of the particle method on models of the theory of shallow water]. *Priladnaya matematika i informatika: Trudy fakul'teta VMiK MGU im. M.V. Lomonosova*. Ed. by Kostomarov D.P., Dmitriev V.I. 2002. No. 10. Pp. 90–101. (rus)
11. Brooks G.R., Aylsworth J.M., Evans S.G., Lawrence D.E. *The Lemieux Landslide of June 20, 1993*, South Nation Valley, Southeastern Ontario. Geological Survey of Canada, Ottawa, Ontario, 1994. 18 p.
12. Kushnereva O.N. *Raschet gidrodinamicheskikh protsessov pri razrushenii vodopodpornykh gruntovykh sooruzheniy i ledovykh obrazovaniy* [Calculation of hydrodynamic processes in the de-

- struction of water-retaining ground structures and ice formations]. PhD tech. sci. diss. Synopsis: 05.23.16. Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN). Novosibirsk, 2012. 18 p. (rus)
13. Churuksaeva V.V. *Chislennoe issledovanie turbulentnykh techeniy v otkrytykh kanalakh i ruslakh na osnove modeli melkoy vody* [Numerical study of turbulent flows in open channels and channels based on the shallow water model]. PhD phys.-math sci. diss. Synopsis: 01.02.05. Tomsk, 2016. 159 p. (rus)
  14. Papchenko N.G. *Modelirovanie potentsial'nogo techeniya dvukhmernykh burnykh vodnykh potokov* [Simulation of the potential flow of two-dimensional turbulent water flows]. PhD phys.-math sci. diss. Synopsis: 05.13.18. settl. Persianovskiy, 2014. 146 p. (rus)
  15. Duvanskaya E.V. Granichnaya zadacha svobodnogo rastekaniya burnogo potoka i ee obshchee reshenie [The boundary problem of free flow of a turbulent flow and its general solution] *Prirodobustroystvo*, 2012. No. 2. Pp. 73–77. (rus)
  16. Kidyayeva V.M. *Otsenka potentsial'noy opasnosti pri proryvakh gornykh ozer* [Assessment of potential danger in the breakthroughs of mountain lakes]. PhD tech. sci. diss. Synopsis: 25.00.27. Moscow, 2014. 195 p. (rus)
  17. Ancey C. *Debris Flows and Related Phenomena*. In «*Geomorphological Fluid Mechanics*». Ed. by N.J. Balmforth and A. Provenzale. Berlin: Springer. 2001. 528 p.
  18. Mel'nikova O.N. *Dinamika ruslovogo potoka* [Dynamics of the channel stream]: tutorial. Moscow: MAKS Press, 2006. 139 p. (rus)
  19. Mel'nikova O.N. Zakhvat graviya golovnoy volnoy, vznikayushchey pri proryve plotiny v sukhom rusle [Capture of gravel by the head wave that occurs when the dam is broken in the dry channel]. *Izvestiya RAN, Physical series*, 2008. Vol. 72. No. 12. Pp. 1793–1796. (rus)
  20. Chebotnikov A.V. *Eksperimental'noe izuchenie voln peremeshcheniya, obrazutsyushchikhsya pri chastichnom razrushenii plotiny* [Experimental study of the displacement waves generated by the partial destruction of the dam]. PhD tech. sci. diss. Synopsis: 05.23.16. Novosibirsk, 2008. 143 p. (rus)