



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.17:627.8.01

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72>



Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ

© Д.Ш. Шарипов^а

^аСнежинский физико-технический институт, филиал Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт», г. Снежинск, Россия

Резюме: Изучение процессов, происходящих в толще земной коры, всегда являлось актуальной темой для исследований. Результаты этих исследований позволили человеку разрабатывать и безопасно эксплуатировать месторождения полезных ископаемых в различных условиях. Рост потребления извлекаемого ресурса и увеличение масштабов горного производства вынуждают предприятия искать решения сложных инженерно-технических задач, одной из которых является проблема сдвижения горных масс и земной поверхности в области влияния промышленного производства, в том числе дамб хвостохранилищ. Целью данного исследования являлось повышение безопасности эксплуатации дамб хвостохранилищ. Объектом исследования стали ограждающие дамбы хвостохранилищ обогатительных фабрик, предметом исследования – деформационные процессы, происходящие в теле дамб и на поверхности откосов. Основными методами исследования, использованными в работе, были: изучение способов безопасной эксплуатации дамб хвостохранилищ на основе эксплуатационных условий хвостохранилища Учалинского месторождения с применением современных методов оценки устойчивости, анализ и обобщение отечественного и зарубежного опыта, а также изучение актуальных методов геомеханического мониторинга деформационных процессов – инженерно-геологических, геофизических, маркшейдерских и гидрогеологических. В статье описаны географические, гидрографические, климатические, геологические, горнотехнические условия эксплуатации хвостохранилища АО «Учалинский ГОК». Представлено обоснование влияния гидродинамических и гидростатических сил на устойчивость ограждающих дамб хвостохранилищ. На основе полученных данных и использованных методов исследования сделан вывод о том, что гидродинамические и гидростатические силы являются основополагающими разрушающими факторами, действующими на дамбы. Результаты данных исследований могут быть применены на стадии проектирования гидротехнических сооружений, так как они дополняют теоретические знания о влиянии жидких отходов на безопасность дамб хвостохранилищ и земляных плотин, а также позволят обнаружить деформационные процессы на начальной стадии развития и принять решения по их устранению.

Ключевые слова: хвостохранилище, гидростатические и гидродинамические силы, дамба, отвалы, устойчивость, АО «Учалинский ГОК», фильтрационный поток, грунтовые воды, перелив, эрозия

Для цитирования: Шарипов Д.Ш. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ. *Науки о Земле и недروпользование*. 2021. Т. 44. № 1. С. 63–72. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72>

Hydrodynamic and hydrostatic forces as factors affecting tailing dump stability

© Dinar Sh. Sharipov^a

^aSnezhinsk Physics and Technology Institute, Branch of National Research Nuclear University
“Moscow Engineering Physics Institute”, Snezhinsk, Russia

Abstract: The study of the processes occurring deep in the earth's crust has always been a relevant research topic. The results of these studies allowed development and safe mining of mineral deposits in various conditions. The growth in the consumption of extracted resource and the increase in the scale of mining are forcing enterprises to search for the solutions to complex engineering and technical problems, one of which is the problem of displacement of rock masses and the earth's surface in industrial production-affected areas including tailings dams. The purpose of this study is to improve the operation safety of tailing dams. The object of the study is embankment dams of dressing plant tailing dumps. The subject of the study is deformation processes occurring in dam bodies and slope surfaces. The main research methods used in the work are: the study of safe operation methods for tailing dams based on the operating conditions of Uchalinskoye tailing dump using the modern methods of stability assessment, analysis and generalization of domestic and foreign experience, as well as the study of current methods of geomechanical monitoring of deformation processes – engineering and geological, geophysical, mine surveying and hydrogeological ones. The article describes geographic, hydrographic, climatic, geological and mining operation conditions of the tailing dump of Uchalinsky GOK (Ore Mining and Processing Plant) JSC. The influence of hydrodynamic and hydrostatic forces on embankment tailing dam stability is substantiated.



Based on the data obtained and the research methods used, it is concluded that hydrodynamic and hydrostatic forces are fundamental destructive factors affecting dams. The results of these studies can be applied at the design stage of hydraulic structures, since they will supplement theoretical knowledge about the impact of liquid waste on the safety of tailing dams and earth-filled dams, as well as allow detecting deformation processes at their initial development stage and making decisions on their elimination.

Keywords: tailing dump, hydrostatic and hydrodynamic forces, dam, dumps, stability, Uchalinsky GOK (Ore Mining and Processing Plant) JSC, filtration flow, groundwater, overflow, erosion

For citation: Sharipov DSh. Hydrodynamic and hydrostatic forces as factors affecting tailing dump stability. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(1):63–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72>

Введение

Успешное развитие экономики любой страны зависит от многих факторов, в том числе и от количества и богатства месторождений полезных ископаемых. Извлекаемый из них ресурс используется в ведущих промышленных отраслях и является источником ощутимого дохода [1–4].

Активное развитие промышленного производства, особенно после Великой Отечественной войны, значительно увеличило потребление добываемых полезных ископаемых. В послевоенное время для стабильного и ускоренного роста экономики страны требовалось расширение минерально-сырьевой базы, увеличение промышленных объемов производства полезных ископаемых, усовершенствование технологий переработки извлекаемого сырья и развитие межотраслевых отношений для использования ценных свойств извлекаемых ресурсов в смежных областях. В настоящее время общие принципы укрепления и роста экономики на основе минерально-сырьевой базы остаются прежними, в связи с этим данная тенденция актуальна и по сей день [5–7].

Все эти обстоятельства вынуждают горные предприятия искать новые месторождения, по возможности повышать объемы производства на существующих горнодобывающих предприятиях, что, в свою очередь, увеличивает количество отбываемой горной массы и жидких отходов, полученных в результате обогащения. Ежегодно из недр Земли извлекаются около 100 млрд т полезных ископаемых, включая 20 млрд т горной массы горно-химического сырья [8]. Сложившаяся ситуация, а также экологические требо-

вания заставляют горнодобывающие предприятия искать больше подотвальных территорий и способов их размещения.

Самым распространенным способом решения данной проблемы является строительство специальных накопителей твердых и жидких отходов – хвостохранилищ. «Хвостохранилище – это комплекс сооружений, предназначенных для складирования твердых и жидких отходов горных предприятий цветной и черной металлургии, образующихся при обогащении полезных ископаемых»¹.

Основными материалами при строительстве данного гидросооружения являются вскрышные породы (твердые отходы), которые используются при сооружении ограждающей дамбы. В свою очередь, возводимая дамба создает необходимый резервуар для хранения жидких отходов обогатительных фабрик и является главным сдерживающим элементом всего объекта. От состояния ограждающей дамбы зависит безопасная эксплуатация хвостохранилища, а также прилегающих к ней территорий.

Частичное или полное разрушение дамбы является наиболее распространенной причиной аварий при эксплуатации данных объектов, наиболее известные случаи таких аварий были зафиксированы на Качканарском горно-обогатительном комбинате (Россия), Карамкенском горно-металлургическом комбинате (Россия), руднике Эль-Кобра (Чили), шахте «Преставель» (Италия), хвостохранилище в Колонтаре (Венгрия), знаковыми случаями стали также прорыв плотин в Мариане и в Брумадинью (Бразилия) и другие [9–16]. В результате крупных аварий жертвами становится проживающее в низовьях дамбы

¹ Железняков Г.В, Ибад-заде Ю.А., Иванов П.Л. [и др.]. Гидротехнические сооружения: справочник / под общ. ред. В.П. Недриги. М.: Стройиздат, 1983. 543 с.



население, разрушаются вахтовые поселки, промышленные объекты, страдают и сельскохозяйственные угодья. В таких случаях основными разрушающими силами являются массовый скоростной поток прорванной жидкости и последующее химическое воздействие жидких отходов. По этой причине на всех этапах эксплуатации подобных гидросооружений необходимо строго соблюдать требуемые технологические регламенты, нарушение которых приводит к катастрофическому экономическому и экологическому ущербу. В связи с этим целью данной работы является повышение безопасности эксплуатации дамб хвостохранилищ на основе исследований условий эксплуатации хвостохранилища АО «Учалинский ГОК» и современных методов оценки устойчивости дамб хвостохранилищ.

Объект и методы исследования

На основе проектных и инженерно-изыскательных данных хвостохранилища АО «Учалинский ГОК» изучены применяемые на производственном объекте инструментальные наблюдения за деформационными процессами, происходящими на поверхности и в теле дамбы, а также методики по обработке и анализу результатов натурных наблюдений. Проведен анализ географических, гидрографических, климатических, геологических, горнотехнических условий эксплуатации Учалинского хвостохранилища. Особое внимание уделялось гидрографии и геологии района размещения объекта, географическому расположению ближайших населенных пунктов, рельефу местности и способу устройства хвостохранилища. Кроме перечисленного проведен анализ таких характеристик, как гранулометрический, минералогический и химический состав отвалов, плотность грунта, пористость и фильтрационные свойства пород ограждающей дамбы. Методы исследований включают также анализ и обобщение отечественного и зарубежного опыта.

Результаты работ и их обсуждение

Хвостохранилище АО «Учалинский ГОК» расположено в 2,5 км от г. Учалы на восточном склоне Южного Урала южных отрогов хребта Ирэндик, который является естествен-

ным водоразделом р. Белой и р. Уй. Ближайшие железнодорожные станции – г. Миасс в 100 км к северу и г. Магнитогорск в 120 км к югу от г. Учалы. Ближайшие населенные пункты на севере – с. Учалы и с. Ургуново, на западе – с. Кунакбаево и с. Ильтебаново.

В гидрографическом отношении район размещения горно-обогатительного комбината расположен в бассейне верхнего течения р. Урал, протекающей в 11 км к северо-западу. В непосредственной близости гидрографическая сеть представлена озерами и мелкими ручьями. В 3 км к северу от промплощадки находится оз. Большие Учалы, на северо-востоке на расстоянии 2,5 км – оз. Карагайлы. Водообильных источников, стекающих в озера, не имеется. Геоморфологически территория приурочена к юго-западному берегу оз. Малые Учалы.

Рельеф промплощадки беспокойный: наблюдаются резкие падения в восточном, юго-восточном, южном и юго-западном направлениях. Местность района холмистая. Рельеф имеет резко выраженный сопочный и мелкосопочный характер. В юго-восточной и юго-западной частях наблюдается заболоченность. Естественный рельеф сильно изменен техногенными процессами, связанными с разработкой месторождений полезных ископаемых.

Климатические условия района определяются его широтной зональностью, абсолютными отметками рельефа и расположением восточнее высокого горного хребта Уралтау. Климат района резко континентальный с холодной продолжительной зимой и коротким летом. Абсолютные минимальные температуры воздуха характерны для зимних месяцев декабря и января (-47°C). Отрицательные температуры отмечались и летом (-5°C в июне, -1°C в августе). Абсолютные максимальные температуры отмечены летом в июле ($+38^{\circ}\text{C}$) и зимой в январе ($+7^{\circ}\text{C}$).

Средняя скорость ветра колеблется от 2,2–2,3 м/с (январь, июль, август) до 3 м/с (октябрь). Максимальная скорость ветра – 14 м/с. Скорость напора ветра – 40 кг/м^3 . Преобладающими ветрами являются южный, юго-западный и западный в зимний период и западный и северо-западный в летний период.



Количество осадков определяется широтной и высотной зональностью, экспозицией склонов по отношению к направлению ветра. Средняя многолетняя величина суммы осадков – 356–459 мм. Средняя многолетняя величина испарения с поверхности суши и воды за год составляет около 0,613 м.

В геологическом отношении в основании хвостохранилища залегают: торфы мало-влажные, уплотненные (толщина слоя – 0,5–2 м в северо-западной части дамбы); суглинки и глины озерно-болотные в твердом и полутвердом состоянии; суглинки элювиальные твердые, полутвердые с включением дресвы и щебня от 15 до 40 %. Суглинки подстилаются порфиритами сильнотрещиноватыми, малопрочными.

Сверху аллювиальные отложения прикрыты почвенно-растительным слоем. Толщина почвенно-растительного слоя – 0,5–1,1 м. Гранулометрический состав хвостов представлен в таблице.

В горнотехническом отношении действующее хвостохранилище АО «Учалинский ГОК» относится к намывному типу. Первичная емкость хвостохранилища организована из двух отсеков с разделительной дамбой между ними. Эксплуатация первого отсека хвостохранилища осуществляется с 1969 г., второго

отсека – с 1974 г. Первичная дамба хвостохранилища, примыкающая в восточной части к отвалу вскрышных скальных пород, отсыпана из скального грунта диабаз и порфири-тов высотой 10–12 м с отметками гребня 530–534 м.

Хвостохранилище предназначено для складирования отвальных отходов технологического производства (хвостов) и технологического водоснабжения обогатительной фабрики. Абсолютный перепад отметок подошвы основания дамбы хвостохранилища изменяется от 520 до 525 м (и несколько выше у восточного крыла южной дамбы).

Хвостохранилище косогорного типа расположено на расстоянии $\approx 1,4$ км к югу от главного корпуса фабрики. С восточной стороны хвостохранилище примыкает к центральному и восточному отвалам вскрышных пород. Центральный отвал в настоящее время разобран до проектных отметок и включается в состав замыкаемой емкости хвостохранилища. Грунты отвала использовались для отсыпки дамб обвалования и пригрузки низового отсека.

В соответствии с проектом реконструкции хвостохранилища с 2003 г. складирование осуществляется намывным способом в действующее хвостохранилище, представляющее

Характеристика отвальных хвостов обогащения Characteristics of final tailings

	Размер частиц d , мм	Содержание, %
Гранулометрический состав хвостов	0,15+0,1	–
	0,1+0,074	19,47
	0,074+0,044	10,65
	0,044+0,02	31,34
	0,02+0,01	6,75
	0,01+0,005	15,12
	0,005	16,67
Средний диаметр частиц d_{cp}	0,036 мм	
Удельная масса твердых частиц γ_{me}	3,8 т/м ³	
Минералогический состав хвостов	Пирит – 60,56 %	
	Халькопирит – 0,55 %	
	Сфалерит – 1,05 %	
	Нерудные – 37,84 %	
Химический состав хвостов	Цинк – 0,71 %	
	Сера – 32,30 %	
	Золото – 1,27 г/г	
	Серебро – 15,97 г/г	
	Медь – 0,19 %	



единое поле. Заполнение емкости производится по схеме: от дамбы к пруду с образованием пляжа из хвостов. Нарращивание ограждающей дамбы начиная с пятого яруса производится путем отсыпки дамб обвалования из крупноблочных щебенистых грунтов отвалов с суглинистым заполнителем.

Параметры дамб обвалования: ширина по гребню – 21 м, заложение откосов – 1:1. Генеральное заложение низового откоса ограждающей дамбы – 1:3,5. Дамбы отсыпаны с дренами длиной 30 м из скального грунта отвалов, расположенными через 250–300 м по периметру дамбы. Дрены предназначены для ускорения процессов консолидации хвостов пляжной зоны и отведения фильтрационных вод в дренажные каналы. На участке полки центрального отвала и на откосе восточного отвала выполнено устройство противофильтрационного экрана из геотекстиля и предусмотрен намыв экрана из хвостов. Принятая конструкция дамб обвалования позволяет улучшить деформационно-напряженное состояние намывной дамбы и увеличить возможность ее наращивания до проектной отметки 582 м.

Эксплуатация хвостохранилища предусмотрена до отметки 582 м, на котором площадь хвостохранилища составит 1,12 км², проектная емкость хвостохранилища – 59 млн м³, протяженность напорного фронта – 3,8 км, максимальная высота намывной дамбы – 62 м.

На ограждающую дамбу хвостохранилища действуют две основные разрушающие силы: гидростатическое давление жидких отходов и гидродинамическое движение фильтрационного потока. Следует уточнить, что в рамках исследования факторов, влияющих на устойчивость хвостохранилищ, гидростатические и гидродинамические силы рассматриваются как источники механического влияния, проявляющиеся в виде физического давления, перемещения частиц горных масс, движения потоков внутри пор ограждающей дамбы и т. п. Процесс химической суффозии является отдельным направлением исследования и рассматривается как отдельный разрушающий фактор.

Главными источниками гидростатического давления является хранимая жидкость. В нашем

случае рассматриваются отходы обогащения полезных ископаемых. Для наглядного представления о влиянии данного фактора достаточно вспомнить закон Паскаля, который указывает на зависимость давления в жидкости от плотности жидкости, ускорения свободного падения и глубины, на которой определяется давление.

Понимание вышесказанного дает представление о том, что ограждающие дамбы хвостохранилищ и грунтовых плотин постоянно находятся под огромным гидростатическим давлением, величина которого растет по мере увеличения объема жидких отходов [16–19]. Также следует отметить, что при полном разрушении ограждающей дамбы от значения гидростатического давления зависит скорость потока, а соответственно, и разрушительная сила прорванной жидкости.

В свою очередь, гидростатическое давление является источником гидродинамических сил, выражающихся в виде фильтрации и перелива. Именно негативное действие фильтрационного потока является распространенной причиной полного или частичного разрушения дамб хвостохранилищ, которое проявляется в виде внутренней суффозии (движения жидкости в поровом пространстве грунтов) и эрозии (поверхностного размыва, отрыва и выпора грунтовых масс) [20–24].

Внутренняя суффозия представляет наиболее серьезную угрозу, и связана она с тем, что при повышении уровня жидких отходов увеличивается фильтрационный поток основания дамбы. Усугубляется ситуация тем фактом, что на начальном этапе строительства основания дамбы зоны повышенной фильтрации визуально и традиционными методами не обнаруживаются, что в дальнейшей эксплуатации объекта может повлечь за собой разрушение гидросооружения [25]. Проведенные исследования показывают, что в 40 % случаях причиной аварии грунтовых плотин является внутренняя суффозия тела ограждающей стенки или основания [26–34].

Кроме жидких отходов еще одним источником механической суффозии являются грунтовые воды. Особую опасность они представляют в период строительства основания дамбы. Именно фильтрационный поток



грунтовых вод приводит к образованию зон повышенной фильтрации в основании дамбы, интенсивность которых может привести к протечке и размыву, создавая угрозу обрушения всего объекта [35–38]. Вследствие этого при проектировании подобных сооружений особо тщательно изучаются гидрогеологические условия места будущего расположения объекта.

К гидродинамическим силам, влияющим на устойчивость дамб хвостохранилищ, также относится процесс перелива жидкости через гребень волны [39–41]. Особенность данного процесса заключается в быстром разрушении и эрозии верхней части дамбы. Время протекания процесса и последствия разрушения зависят от скорости перетекания жидких отходов и параметров ветровых волн. Аварии в структуре гидроузлов, несоблюдение технологического регламента режима работ системы водоотведения и несвойственные для района расположения объекта погодные условия, а именно сильные порывы ветра, служат основными причинами возникновения перелива [42]. Около 33 % аварий на грунтовых гидросооружениях связано с локальными или массовыми переливами хранимой жидкости через гребень волны [43, 44].

Заключение

Строительство и эксплуатация хвостохранилищ требует решения сложных инженерно-технических задач. От результатов принятых

мер зависит целостность объекта и прилегающих территорий. Для обеспечения безопасной эксплуатации подобных гидросооружений необходим постоянный мониторинг и информативность напряженно-деформационного состояния ограждающей дамбы, поиск новых способов изучения деформационных процессов, пополнение и применение теоретических знаний в этой области.

По результатам проведенной работы можно сделать вывод о том, что на долю влияния гидродинамических и гидростатических сил приходится 73 % (40 + 33 %) аварий грунтовых дамб и плотин. Из этого следует, что в рамках исследований факторов, влияющих на устойчивость хвостохранилищ, именно эти силы являются основными разрушающими факторами, проявляющимися в виде постоянного действия гидростатического давления, движения фильтрационных потоков в теле и в основании ограждающей дамбы, перелива и эрозии.

Результаты, представленные в данной научной работе, дополняют теоретические знания о влиянии жидких отходов и грунтовых вод с точки зрения действия гидродинамических и гидростатических сил на устойчивость дамб хвостохранилищ и земляных плотин. Практическое применение данных знаний на стадии проектирования гидротехнических сооружений позволит обнаружить процессы деформации на начальной стадии развития и принять меры по их устранению.

Список литературы

1. Ключев Н.Н. Природно-ресурсная сфера России и тенденции ее изменения // Вестник Российской академии наук. 2015. № 7. С. 579–592. <https://doi.org/10.7868/S0869587315050035>
2. Ключев Н.Н. Природно-ресурсный комплекс России: траектория «неустойчивого» развития // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. № 5. С. 7–22.
3. Межеловский Н.В., Монастырных О.С., Бучкин М.Н., Вилькович Р.В., Килипко В.А., Мишин С.А. Инвестиционный анализ воспроизводства минерально-сырьевой базы России // Разведка и охрана недр. 2012. № 2. С. 90–102.
4. Шелкунов Т.Г. Особенности реализации инновационных проектов в горнодобывающей промышленности России // Экономика в промышленности. 2015. № 4. С. 32–38.
5. Орлов В.П. Минерально-сырьевые ресурсы и геополитика // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2011. № 2. С. 23–26.
6. Толстых Н.И. Проблемы правового регулирования недропользования при разработке месторождений общераспространенных полезных ископаемых // Недропользование XXI век. 2007. № 6. С. 2–7.
7. Александрова В.И. Моделирование и ГИС-технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № S6. С. 34–44.
8. Пигарева Т.А., Абакумов Е.В. Биологические параметры почв и техногенных субстратов хвостохранилищ предприятия по добыче железной руды // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 28–33.
9. Калашник Н.А. Компьютерное моделирование насыпной земляной плотины как прототип ограждающей дамбы хвостохранилища // Международный научно-исследовательский журнал. 2012. № 4. С. 54–55.



10. De Carvalho D.W. The ore tailings dam rupture disaster in Mariana, Brazil 2015: what we have to learn from anthropogenic disasters // *Natural Resources Journal*. 2019. Vol. 59. Iss. 2. P. 281–300.
11. De Carvalho D.W. The brumadinho dam rupture disaster, Brazil 2019: analysis of the narratives about a disaster from the perspective of disaster law // *Revista de Estudos Constitucionais, Hermeneutica e Teoria do Direito*. 2020. Vol. 12. Iss. 2. P. 227–238. <https://doi.org/10.4013/rechtd.2020.122.04>
12. Stanwick P.A., Stanwick S.D. The vale Brazilian dam collapse: an ethical and engineering disaster // *American Journal of Sciences and Engineering Research*. 2019. Vol. 2. Iss. 6. P. 6–11.
13. Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M., Edwards S.J., Macklin M.G., Hudson-Edwards K.A. Mine tailing dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation // *Applied Geochemistry*. 2014. Vol. 51. P. 229–245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
14. Буренкова В.В., Буренков П.М. Отечественный опыт оценки фильтрационной прочности несвязанных грунтов тела плотины и основания // *Природообустройство*. 2020. № 4. С. 84–91.
15. Саинов М.П., Четкин И.П. Оценка трещиностойкости ядра каменно-земляной плотины с учетом порового давления // *Вестник Евразийской науки*. 2020. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://esj.today/PDF/09SAVN420.pdf> (11.11.2020).
16. Калашник А.И., Калашник Н.А., Запорожец Д.В. Исследование состояния насыпного гидротехнического сооружения на моренном основании // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2014. № 6. С. 93–98.
17. Потапов И.А., Шименкова А.А., Потапов А.Д. Зависимость суффозионной устойчивости песчаных грунтов различного генезиса от типа фильтрата // *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2012. № 5. С. 79–86.
18. Кашарин Д.В., Тхай Тхи Тхи Ким. Повышение устойчивости основания мобильных дамб для инженерной защиты зданий от затопления // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 4. С. 51–59.
19. Максимов Д.А. Механизмы негативного влияния локальных нарушений фильтрационной устойчивости на надежность насыпных гидротехнических сооружений // *Проблемы недропользования*. 2018. № 2. С. 90–97. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.02.090>
20. Юркевич Н.В., Юркевич Н.В., Гуреев В.Н., Мазов Н.А. Проблемы контроля фильтрации вод через гидротехнические сооружения в условиях вечной мерзлоты // *Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 4. С. 126–138.
21. Колосов М.А., Беляков П.В. Эрозия грунтовых насыпных плотин при подтоплении весенними паводками // 27-е пленарное Межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: материалы конф. Ижевск, 2012. С. 136–138.
22. Козионов А.П., Пяйт А.Л., Мохов И.И., Иванов Ю.П. Алгоритм на основе модели передаточной функции и одноклассовой классификации для обнаружения аномального состояния дамб // *Информационно-управляющие системы*. 2015. № 6. С. 10–18. <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.6.10>
23. Косиченко Ю.М. Исследования в области борьбы с фильтрацией и эксплуатационной надежности грунтовых гидротехнических сооружений // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. 2012. № 2. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec574-field12.pdf (11.11.2020).
24. Шешуков Е.Г., Курцева К.П. Численное исследование краевых задач нелинейной фильтрации // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2012. № 9-10. С. 158–166.
25. Давлатшоев С.К. Гидрогеохимический мониторинг в основании плотины на водорастворимых породах // *Тинчуринские чтения: XIV Междунар. молод. науч. конф. Казань, 2019*. С. 203–207.
26. Попельски П., Дабска А. Численная модель суффозии // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. В.Е. Веденеева*. 2014. Т. 271. С. 23–33.
27. Васильева Е.В., Яковенко Е.А. Повышение безопасности плотин и дамб // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. 2017. № 4. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec340-field12.pdf (11.11.2020).
28. Бакланова Д.В. Расчет фильтрации через земляные дамбы на проницаемом основании // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. 2016. № 1. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec402-field6.pdf (11.11.2020).
29. Бакланова Д.В. Расчетное обоснование вероятности разрушения потенциально опасных участков крупного канала от фильтрационных воздействий // *Природообустройство*. 2013. № 2. С. 43–48.
30. Калашник Н.А. Оценка надежности насыпного грунтового сооружения при образовании в его теле зоны повышенной фильтрации // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2019. Т. 11. № 2. С. 69–74. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.69-74>
31. Хайруллина Е.А. Воздействие фильтрационных вод шламохранилища с соледержащими отходами на поверхностные и подземные воды // *Географический вестник*. 2018. № 2. С. 145–155. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-2-145-155>
32. Жиленков В.Н., Халенева М.Л. О некоторых средствах обеспечения фильтрационной прочности грунтовых плотин, подвергшихся внешнему промораживанию // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. 2013. Т. 269. С. 40–51.
33. Иванов Д.В., Давлетзянов И.И., Маланин В.В. Сравнительный анализ способов фильтрации при определении концентрации растворенных форм металлов в природных и сточных водах // *Российский журнал прикладной экологии*. 2020. № 3. С. 17–22.



34. Павлов С.Х., Оргильянов А.И., Бадминов П.С., Крюкова И.Г. Фильтрационные утечки из золошлакоотвала и их взаимодействия с геологической средой // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2014. Т. 7. С. 100–115.

35. Любимова Т.В., Латыш А.А. Динамика изменения уровня подземных вод в зоне грунтовых плотин // Геология, география и глобальная энергия. 2020. № 4. С. 84–88.

36. Бальзанников М.И., Родионов М.В. Грунтовые плотины с низовыми откосом, допускающим пропуск паводковых вод // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2012. Т. 15. С. 99–104.

37. Круглов Г.Г., Линкевич Н.Н., Немеровец О.В. Фильтрация в обход подпорных гидротехнических сооружений // Наука и техника. 2020. Т. 19. № 3. С. 252–257. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-252-257>

38. Дьяконова Т.А., Писарев А.В., Хоперсков А.В., Храпов С.С. Математическая модель динамики поверхностных вод // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. 2014. № 1. С. 35–45. <https://doi.org/10.15688/jvolsu1.2014.1.4>

39. Кузнецов Д.В. Сценарий аварий грунтовых плотин при переливе воды через гребень плотины методом анализа дерева отказов // Вестник Московского

государственного строительного университета. 2016. № 4. С. 94–107.

40. Пряхина Г.В., Боронина А.С., Попов С.В., Распутина В.А., Войнаровский А.Е. Физическое моделирование разрушения грунтовой дамбы водохранилища в процессе переполнения водоема // Известия Русского географического общества. 2019. Т. 151. № 2. С. 51–63. <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151251-63>

41. Дьяченко К.Н., Зверев А.В. Причины образования дефектов в дамбах обвалования при их эксплуатации в условиях Дальнего Востока // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 6. С. 96–105. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-6-8>

42. Стефанишин Д.В., Штильман В.Б. К оценке вероятности перелива воды через гребень плотины // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 9. С. 70–78. <https://doi.org/10.5862/MCE.35.9>

43. Богославчик П.М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе // Наука и техника. 2018. Т. 17. № 4. С. 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296>

44. Богославчик П.М., Евдокимов В.А., Немеровец О.В. Условия разрушения крепления низового откоса грунтовой плотины при переливе воды через гребень // Вода. Газ. Тепло 2020: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 2020. С. 257–260.

References

1. Klyuev NN. Russia's natural-resource sphere and trends in its development. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2015;7:579–592. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869587315050035>

2. Klyuev NN. Russian natural-resource complex: the trajectory of unsustainable development. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2014;5:7–22. (In Russ.)

3. Mezhelovsky NV, Monastyrnyh OS, Buchkin MN, Vilkovich RV, Kilipko VA, Mishin SA. Investment analysis of a mineral-raw-material base reproduction of Russia. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*. 2012;2:90–102. (In Russ.)

4. Shelkunova TG. Features of realization of innovative projects in the Russian mining industry. *Ekonomika v promyshlennosti = Russian Journal of Industrial Economics*. 2015;4:32–38. (In Russ.)

5. Orlov VP. Mineral resources and geopolitics. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. 2011;2:23–26. (In Russ.)

6. Tolstykh NI. Issues of legal regulation of subsoil use when developing common mineral deposits. *Nedropol'zovanie XXI vek*. 2007;6:2–7. (In Russ.)

7. Aleksandrova VI. Modeling and GIS-technologies. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2011;S6:34–44. (In Russ.)

8. Pigareva TA, Abakumov EV. Biological parameters of soil and anthropogenic substrates of tailing dumps of an iron ore mine. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya =*

Theoretical and Applied Ecology. 2015;1:28–33. (In Russ.)

9. Kalashnik NA. Computer modeling of an earth-fill dam as a prototype of an embanking tailings dam. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*. 2012;4:54–55. (In Russ.)

10. De Carvalho DW. The ore tailings dam rupture disaster in Mariana, Brazil 2015: what we have to learn from anthropogenic disasters. *Natural Resources Journal*. 2019;59(2):281–300.

11. De Carvalho DW. The brumadinho dam rupture disaster, Brazil 2019: analysis of the narratives about a disaster from the perspective of disaster law. *Revista de Estudos Constitucionais, Hermeneutica e Teoria do Direito*. 2020;12(2):227–238. <https://doi.org/10.4013/rechtd.2020.122.04>

12. Stanwick PA, Stanwick SD. The vale Brazilian dam collapse: an ethical and engineering disaster. *American Journal of Sciences and Engineering Research*. 2019;2(6):6–11.

13. Kossoff D, Dubbin WE, Alfredsson M, Edwards SJ, Macklin MG, Hudson-Edwards KA. Mine tailing dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*. 2014;51:229–245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>

14. Burenkova VV, Burenkov PM. Domestic experience of assessing the filtration strength of non-cohesive soils of dam body and base. *Prirodoobustroistvo*. 2020;4:84–91. (In Russ.)

15. Sainov MP, Chechetkin IP. Crack resistance of embankment dam core with consideration of pore pressure. *Vestnik Evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*.



2020;4. Available from: <https://esj.today/PDF/09SAVN420.pdf> [Accessed 11th November 2020]. (In Russ.)

16. Kalashnik AI, Kalashnik NA, Zaporozhets DV. Evaluation of bulk earth structure on morainic foundation. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2014;6:93–98. (In Russ.)

17. Potapov IA, Shimenkova AA, Potapov AD. Dependence of suffusion stability of sandy soils of various geneses on the type of filtrate. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2012;5:79–86. (In Russ.)

18. Kasharin DV, Thai Thi Kim Chi. Increasing stability of flexible dam-foundations in engineering protection of buildings from flooding. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Magazing of Civil Engineering*. 2013;4:51–59. (In Russ.)

19. Maksimov D.A. Mechanisms of negative influence of local filtration stability disturbances on the made ground hydrotechnical facilities reliability. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2018;2:90–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.02.090>

20. Yurkevich NV, Yurkevich NV, Gureyev VN, Mazov NA. Problems of controlling water filtration in hydraulic structures in permafrost regions. *Izvestiya tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(4):126–138. (In Russ.)

21. Kolosov MA, Belyakov PV. Erosion of ground fill dams during spring floodings. *27-e plenarnoe Mezhdunarodnoye koordinatsionnoe soveshchanie po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov: materialy konferentsii = 27th plenary Interuniversity coordination meeting on the problem of erosion, channel and estuarine processes: conference proceedings*. Izhevsk; 2012. p.136–138. (In Russ.)

22. Kozionov AP, Pyayt AL, Mokhov II, Ivanov UP. Algorithm for dike abnormal behavior detection based on transfer function model and one-class classification. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2015;6:10–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.6.10>

23. Kosichenko YM. Investigations of filtration control and operational reliability for earth hydraulic structures. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*. 2012;2. Available from: http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec574-field12.pdf [Accessed 11th November 2020]. (In Russ.)

24. Sheshukov EG, Kurtseva KP. Numerical study of boundary value problems of nonlinear filtration. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2012;9-10:158–166. (In Russ.)

25. Davlatshoev SK. Hydrogeochemical monitoring at the dam base on water-soluble rocks. *Tinchurinskii chteniya: XIV Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konfe-rentsiya = Tinchurin readings: 14th International youth scientific conference*. Kazan; 2019. p.203–207. (In Russ.)

26. Popelsky P, Dabska A. Numerical model of suffusion. *Izvestiya Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. V.E. Vedeneeva*. 2014;271:23–33. (In Russ.)

27. Vasil'eva YeV, Yakovenko YeA. Improving dams and dikes safety. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*. 2017;4. Available from: http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec340-field12.pdf [Accessed 11th November 2020]. (In Russ.)

28. Baklanova DV. Calculating filtration through earth dams at permeable foundation. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*. 2016;1. Available from: http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec402-field6.pdf [Accessed 11th November 2020]. (In Russ.)

29. Baklanova DV. The calculated substantiation of the destruction probability of potentially dangerous parts of a large canal resulted from filtration impacts. *Prirodobustroistvo*. 2013;2:43–48. (In Russ.)

30. Kalashnik NA. Assessment of reliability of a bulk soil dam during formation of an increased filtration zone in its body. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2019;11(2):69–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.69-74>

31. Khayrulina EA. Influence of slurry storage facility with salt-bearing wastes on the surface and ground waters. *Geograficheskii vestnik = Geographical bulletin*. 2018;2:145–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-2-145-155>

32. Zhilenkov VN, Khalenova ML. On some means of seepage strength of embankment dams exposed to external freezing. *Izvestiya Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva*. 2013;269:40–51. (In Russ.)

33. Ivanov DV, Davletzyanov II, Malanin VV. Comparative analysis of filtration methods in determining the concentrations of dissolved forms of metals in natural and waste waters. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2020;3:17–22. (In Russ.)

34. Pavlov SKh, Orgilynov AI, Badminov PS, Krjukova IG. The filtration leakage from ash dumps and their interaction with the geological environment. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Nauki o zemle" = The bulletin of Irkutsk State University. Series "Earth Sciences"*. 2014;7:100–115. (In Russ.)

35. Lyubimova TV, Latysh AA. Dynamics of changes in the ground water level in the area of underground dams. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya = Geology, geography and global energy*. 2020;4:84–88. (In Russ.)

36. Bal'zannikov MI, Rodionov MV. Downstream side soil dams allowing flood water flow. *Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya Rossiiskoi akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk*. 2012;15:99–104. (In Russ.)

37. Kruglov GG, Linkevich NN, Nemerovets OV. Filtration bypassing retaining hydraulic structures. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*. 2020;19(3):252–257.



(In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-252-257>

38. Dyakonova TA, Pisarev AV, Khoperskov AV, Khrapov SS. Mathematical model of surface water dynamics. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Fizika = Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics.* 2014;1:35–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.15688/jvolsu1.2014.1.4>

39. Kuznetsov DV. Scenario of an accident of soil dams in case of water spill over a dam crest by using fault tree analysis. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta.* 2016;4:94–107. (In Russ.)

40. Pryakhina G.V., Boronina A.S., Popov S.V., Rasputina V.A., Voinarovskii A.E. Physical modelling of the destruction of reservoir ground dam in consequence of the overflow of water body. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva.* 2019;151(2):51–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151251-63>

41. Dyachenko KN, Zverev AV. Causes of the Flaws Formation in Floodwalls in the Process of their Use in the

Conditions of the Far East. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water sector of Russia: problems, technologies, management.* 2017;6:96–105. (In Russ.) <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-6-8>

42. Stefanyshyn DV, Shtilman VB. Towards assessing the probability of water overflow across the dam crest. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Magazine of Civil Engineering.* 2012;9:70–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.5862/MCE.35.9>

43. Bogoslavchik PM. Calculation model of soil dam wash-away due to overflow. *Nauka i tekhnika = Science & Technique.* 2018;17(4):292–296. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296>

44. Bogoslavchik PM, Evdokimov VA, Nemerovets OV. Destruction conditions for earth-filled dam downstream side pavement during water overflow over the ridge. *Voda. Gaz. Teplo 2020: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Water. Gas. Heat 2020: Proceedings of International scientific and technical conference.* Minsk; 2020. p.257–260. (In Russ.)

Сведения об авторе / Information about the author



Шарипов Динар Шамилевич,

аспирант,
Снежинский физико-технический институт,
филиал Национального исследовательского ядерного университета
«Московский инженерно-физический институт»,
456776, г. Снежинск, ул. Комсомольская, 8, Россия,
✉ e-mail: Dinar.Shamilevich@yandex.ru

Dinar Sh. Sharipov,

Postgraduate Student,
Snezhinsk Physics and Technology Institute,
Branch of National Research Nuclear University
“Moscow Engineering Physics Institute”,
8 Komsomolskaya St., Snezhinsk 456776, Russia,
✉ e-mail: Dinar.Shamilevich@yandex.ru

Заявленный вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 02.12.2020; одобрена после рецензирования 22.01.2021; принята к публикации 26.02.2021.

The article was submitted 02.12.2020; approved after reviewing 22.01.2021; accepted for publication 26.02.2021.