

Санкт-Петербургский государственный университет

МАКУШИН Мирон Алексеевич

Выпускная квалификационная работа

Расчет характеристик прорана в грунтовых плотинах и максимальных расходов при переливе водохранилищ

Магистратура

Направление *05.04.04 «Гидрометеорология»*

Основная образовательная программа *ВМ.5745.2017 «Опасные гидрологические явления: от мониторинга до принятия решений (ГОЯ)»*

Научный руководитель:

Доцент кафедры Гидрологии суши,

Кандидат географических наук

Старший научный сотрудник

Виноградова Татьяна Александровна

Рецензент:

Кандидат географических наук

Казакова Екатерина Николаевна

Санкт-Петербург

2019

Введение	3
Глава 1. Аналитический обзор процесса формирования и развития прорана при переливе грунтовой плотины и способов и методов расчета характеристик прорана и максимальных расходов	4
Глава 2. Обзор объектов исследования.....	26
Глава 3. Расчет гидравлично-морфометрических параметров прорана и максимальных расходов воды по выбранным методикам	39
Раздел 3.1. Обоснование используемых расчетных методов	39
Раздел 3.2. Расчет характеристик прорана и максимальных расходов воды ...	43
Раздел 3.3 Альтернативные теоретические подходы расчета образования прорана	51
Заключение	55
Список используемой литературы	57

Введение

Водохранилища, подпруженные грунтовыми плотинами, распространены по всему земному шару и в России, в частности, так как они довольно дешевы с точки зрения строительства. Однако, большинство таких плотин, будучи построены еще в прошлом веке, находятся в аварийном состоянии, либо были нарушения при проектировании, которые не учли возможность перелива. Данные аспекты становятся причинами масштабных катастрофических паводков в результате перелива водохранилища через гребень плотины, которые наносят значительный материальный ущерб близлежащим территориям и уносят множество людских жизней.

Одной из основных особенностей перелива через грунтовую плотину является формирования прорана - промоины при прорыве водным потоком напорного гидротехнического сооружения, например, дамбы или земляной плотины. Формирование и увеличение прорана ведет за собой сброс воды из водохранилища и его последующее опорожнение. Описание этого процесса дает возможность получить картину опорожнения водохранилища, а также максимальных расходов воды во время сброса воды. Однако же большинство методик, призванных описывать данный процесс, имеет ряд недостатков, связанных неточностью описания данного процесса.

Цель данной работы - дать оценку существующим способам и методам расчета характеристик прорана и максимальных расходов при переливе водохранилища с грунтовой плотиной и на основе данной оценке провести расчеты по выбранным объектам. В рамках данной цели были поставлены следующие задачи:

- Создание информационной базы случаев прорыва водохранилищ при переливе грунтовой плотины, в которую входят площадь и объем резервуара, высота дамбы и длина по гребню, а также ширина образовавшегося прорана, объем паводка и максимальный расход воды;
- Выделение основных этапов процесса образования прорана и факторов, на него влияющих;
- Аналитический обзор существующих способов расчета характеристик прорана и максимальных расходов воды при прорыве водохранилищ;
- Расчет гидравлико-морфометрических характеристик прорана и максимальных расходов воды по выбранным методикам на основе

собранных данных о случаях прорывов водохранилищ и анализ полученных результатов;

- Формулировка альтернативных подходов к расчету характеристик прорана на основе анализа процесса формирования прорана;
- На основе выполненных задач сформулировать основные выводы по работе.

Глава 1. Аналитический обзор процесса формирования и развития прорана при переливе грунтовой плотины и способов и методов расчета характеристик прорана и максимальных расходов

Грунтовая плотина – одно из наиболее распространенных гидротехнических подпорных сооружений. В основу материала такой плотины составляет песчаный, суглинистый или глинистый грунт. При проектировании таких плотин учитывается и рассчитывается довольно большой спектр факторов, таких как фильтрация, устойчивость откосов, сейсмоустойчивость и т.д. Также немаловажным аспектом является проектирование водосбросных сооружений. Тем не менее, грунтовые плотины – это наиболее простые водоподпорные конструкции, которые могут строиться практически везде.

Согласно [10] основными причинами катастрофических явлений на грунтовых плотинах являются:

- Ошибки при проектировании, связанные с недостаточно тщательными изысканиями
- Прохождения значительных паводков
- Нарушения, связанные с неправильной эксплуатацией сооружения либо же его неудовлетворительное состояния

Все эти причины в конечном итоге могут привести к разрушению плотины и формированию мощного паводка в нижнем бьефе, которое вызывает значительный материальный ущерб и гибель населения.

Немалое количество таких катастроф связано с переливом воды через грунтовую плотину, которое связано с прохождением паводков, с которыми водопропускные сооружения не могут справиться. При переливе водохранилища в процессе постепенного размыва материала плотины образовывается прорана. Прораном называют образовавшуюся промоину при прорыве водным потоком напорного гидротехнического сооружения, например, дамбы или земляной плотины. Формирование и развитие прорана играет ключевую роль в процессе сброса воды из водохранилища. За счет увеличения

размеров поперечного сечения прорана происходит увеличения сбрасываемой. С другой стороны, увеличение сброса воды ведет к увеличению динамических характеристик потока, что сказывается на выносе грунта из прорана. Такой неоднозначный характер взаимосвязи между сбросом воды из водохранилища и увеличением размеров прорана ведет к усложнению возможности физического и математического описания процесса сброса воды из водохранилища. В связи с этим необходимо разобраться в сути процесса образования прорана, выделить основные этапы его формирования и факторы, на него влияющие.

Прежде всего необходимо определить основные факторы, силы внешнего воздействия и силы сопротивления, которые определяют устойчивость плотины. Безусловно, основной силой, воздействующей на грунт плотины является поток сбрасываемой воды из водохранилища в случае перелива плотины. Под действием переливающейся через плотину воды происходит постепенный размыв грунта и образование начального прорана. Большинство видеоматериалов и свидетельств указывают на то, что изначально никакого прорана нет, и вода переливается через гребень плотины сплошным слоем. Образование начального прорана при этом может начаться в любом месте гребня плотины и, по большому счету, приурочено к тем местам, где грунт уплотнен довольно слабо [18]. В течение времени, пока происходит переливание сплошным слоем, под действием воды, движущейся с большой скоростью, с гребня плотины выносятся материал. Стоит отметить и то, что внешний откос при этом также подвержен эрозии, о чем свидетельствовали видеоматериалы Оровильской плотины в Калифорнии. Из тех мест, где грунт уплотнен был слабо, либо вследствие каких-либо внешних воздействий появились нарушения в теле плотины, вынос материала производится куда более интенсивнее, и в этом месте под действием эродирующих свойств водного потока происходит образования начального прорана. По мере увеличения сброса воды, увеличивается и вынос материала. Тем самым можно утверждать, что увеличение прорана напрямую зависит от потока воды. С другой стороны, чем больше становится проран, тем больше увеличивается его пропускная способность и тем больше проходит через него воды. Из этого следует, что увеличение прорана также напрямую влияет и на сброс воды, его увеличение и время полного опорожнения водохранилища. По мере сброса воды, происходит углубление прорана до тех пор, пока отметка его глубины не окажется на отметке нижнего бьефа, после чего происходит увеличение поперечного сечения за счет обрушения бортов. Большинство снимков разрушенных плотин, как с мест происшествий, так и спутниковые, показывают, что поперечное сечение многих проранов на финальной его стадии являются трапецидальными, что связано как раз с обрушением бортов. Поведение гидрографов стока для подобных явлений можно охарактеризовать

плавным подъемом до значения максимального расхода воды прорывного паводка. Этот плавный подъем связан с тем, что разрушение плотины не происходит мгновенно, большинство подобных явлений может происходить до нескольких часов и, во многом зависит от размеров плотины, ее ядра, а также степени уплотнения грунта при строительстве. Затем на гидрографе истечения воды наблюдается быстрый спад.

Воздействие воды определяет выноса материалов с гребня плотины, а затем и из прорана. Во многом это зависит от динамических характеристик потока, в частности от скорости, а также от свойств самого грунта. Согласно (РД, и т.д.) в качестве одной из динамических характеристик, которая непосредственно влияет на размываемость грунтов, называют неразмывающую скорость. Это характеристика есть некое предельное значение скорости потока, выше которого начинается размыв грунта и вынос материал. Согласно [6], предельная неразмывающая скорость зависит от грунта, размеров поперечного сечения, в котором происходит размыв, а также от наличия в воде взвешенных частиц, однако по [9] уточняется, что скорость зависит от глубины потока, а также от нормативной усталостной прочности на разрыв, которая в свою очередь зависит от удельного сцепления грунта - прочностной характеристики, определяемой как сопротивление структурных связей грунтов любому перемещению связываемых ими частиц. В [13] приводится таблица (Таблица 1) неразмывающих скоростей потока в зависимости от удельного сцепления грунта и глубины потока. Из этой таблицы можно сделать вывод о том, что данная характеристика увеличивается с глубиной. Кроме того, увеличение неразмывающей скорости связано и с увеличением расчетного сцепления грунта. В данном случае, чем больше сцепление имеет грунт, тем больше должна быть значение неразмывающей скорости потока, после достижения которого начинается непосредственно сам размыв. Используя данную характеристике для расчетов, можно пронаблюдать с какого момента будет начинаться размыв начального прорана. В случае, когда скорость потока воды из водохранилища меньше предельной неразмывающей скорости, размыв не будет происходить. Однако если значение скорости перешагнет данный предел, начнется размыв грунта и, следовательно, формирование и дальнейшее увеличение прорана.

Таблица 1 - Допускаемые неразмывающие скорости для связных грунтов (по Штеренлихту)

Расчетное сцепление, $C_{расч}$, 10^5 Па	Допускаемые неразмывающие средние скорости V , м/с, при глубине потока, h , м			
	0,5	1	2	3
0,005	0,39	0,43	0,49	0,52
0,010	0,44	0,48	0,55	0,58
0,020	0,52	0,57	0,65	0,69
0,030	0,59	0,64	0,74	0,78
0,040	0,65	0,71	0,81	0,86
0,050	0,71	0,77	0,89	0,98
0,100	0,96	1,04	1,20	1,27
0,125	1,03	1,13	1,30	1,37
0,150	1,13	1,23	1,41	1,49
0,200	1,28	1,40	1,60	1,69
0,250	1,42	1,55	1,78	1,88
0,300	1,54	1,69	1,94	2,04
0,400	1,79	1,96	2,25	2,38
0,500	1,99	2,17	2,50	2,63
0,600	2,16	2,38	2,72	2,88

Однако, кроме внешнего воздействия так же существуют и силы сопротивления, которые препятствуют размыву грунта. В общем и целом, сопротивляемость грунта размыву связано с таким понятием в грунтоведении, как размываемость грунта – способность грунтов разрушаться под влиянием движущейся воды [11]. Согласно [11], выделяют три типа данного процесса: поверхностная (связанная с движением воды по касательной к поверхности грунта), лобовая (обусловленная воздействием на грунт во фронте, волновое воздействие) и суффозионное (связанное с выносом частиц грунта фильтрационным потоком). Основными характеристиками первого типа, который во многом проявляется в процессе формирования прорана, являются размывающая скорость, интенсивность размыва (отношение средней толщины размытого слоя ко времени размыва) и интенсивность смыва (отношение потери массы грунта ко времени и площади) [11]. Для связных грунтов размываемость связана с таким свойством грунтов как размокаемость: неразмокаемые грунты размываются лишь при длительном воздействии, а размокаемые могут размываться гораздо быстрее. Значительную роль при оценке размываемости грунта играют прочностные характеристики грунта, в

частности сцепление, которые влияют на значение размывающей скорости. Связные грунты наиболее подвержены размыву [11], так как процесс размыва, происходящий под воздействием текучей воды, происходит за счет выноса частиц грунта, в результате чего нарушаются структурные связи. Размываемость грунта зависит прежде всего от физико-механических свойств грунта (пластичность, сцепление, твердость и т.д.).

При воздействии движущейся воды на грунт через поверхностный размыв возникают касательные или сдвиговые деформации. Основной мерой касательных деформаций является относительная деформация сдвига, равная тангенсу угла перекоса, который определяется как отношение между величиной абсолютного сдвига параллельных слоев тела грунта относительно друг друга и расстоянием между слоями [11]. Анализируя данный вопрос, стоит указать о характеристиках сопротивления грунта сдвигу. Для связных грунтов основными характеристиками будут являться сцепление грунта и угол внутреннего трения. Данные показатели во многом зависят от влажности грунта: чем выше влажность грунта, тем ниже величина сцепления и величина угла внутреннего трения. Первое снижается за счет разрушения структурных связей, второе за счет снижения трения на контактах грунтов основными характеристиками будут являться сцепление грунта и угол внутреннего трения. Данные показатели во многом зависят от влажности грунта: при увеличении влажности грунта снижается величина сцепления за счет разрушения структурных связей и величина угла внутреннего трения за счет снижения трения на контактах. В общем виде сопротивление грунтов сдвигу записывается следующим образом [11]

$$\tau = \sigma * \tan \varphi + c$$

Где τ – сопротивление сдвигу, φ – угол внутреннего трения, c – сцепления.

Обобщая вышесказанное, можно сделать следующие выводы о процессе формирования и развитии прорана:

- Образование начального прорана и последующий размыв зависит от двух аспектов: динамических характеристик потока и характеристик грунта по отношению к действию движущейся воды;
- Основной динамической характеристикой потока, которая вызывает размыв, является скорость воды, а точнее неразмывающая скорость потока.

- Сопротивление грунта размыву есть ничто иное, как сопротивление грунта сдвигу, которое зависит от угла внутреннего трения и сцепления.

Вопрос расчета прорыва грунтовых плотин водным потоком – чрезвычайно сложный и имеющий довольно большое количество аспектов, которые необходимо учитывать. Кроме объемов воды в водохранилище на момент прорыва и уровня необходимо учитывать материал грунтовой плотины и гидравлические характеристики прорана (глубина прорана, ширина, глубина потока, расход воды через проран), которые, несомненно, изменяются по мере того, как сбрасываются воды из водного объекта. Следовательно, методики расчетов, которые необходимо использовать для описания столь сложного процесса, обязаны учитывать вышеуказанные аспекты.

На данный момент довольно широкое распространение получили следующие методические указания: «Методические рекомендации по определению расходов воды при проектировании переходов через водотоки в зоне воздействия некапитальных плотин» (в дальнейшем ПМП) и «Методические рекомендации по расчету развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов» РД 03-607-03.

ПМП, согласно теоретическому описанию, позволяет получить значения расхода воды в местах, расположенных в зоне влияния низконапорных плотин. Кроме того, приведенные в ней расчеты можно использовать в случае прорыва водохранилища. Данная методика опирается на данные, собираемые в ходе обследования интересующего участка. В частности, собираются данные о периоде постройки плотины, наличии на ней водосбросных сооружений, материале плотины, напоре, состоянии плотины на момент обследования, объеме, информация о случившихся в прошлом прорывах и о мерах предотвращения катастроф, которые производились.

В основу расчетной схемы входят теоретические положения гидравлики и гидродинамики. В основу расчета расходов воды при переливе через грунтовую плотину входит формула расхода водослива с широким порогом

$$Q = m * b * \sqrt{2 * g * H^{3/2}}$$

Где m – коэффициент расхода воды, b – ширина порога водослива, H – напор. Это связано с тем, что для большинства плотин водосбросные сооружения проектируется как водосливы с широким порогом [12]. Также в данных методических рекомендациях ссылаются на «Указания по определению расчетных гидрологических характеристик» СН-435-72, современным аналогом

которого является СНиП 2.01.14-83 «Определение расчетных гидрологических характеристик, а также на «Инструкцию по расчету ливневого стока воды с малых бассейнов» ВСН 63-76. Данные нормативные документы используются при инженерных гидрометеорологических и гидрологических изысканиях

Схема расчетов состоит из следующих пунктов. Расход воды при прорыве рассчитывается по следующей формуле,

$$Q_{\text{п}} = B_{\text{п}} * H_{\text{п}}^{3/2} * K_{\text{пр}}(1)$$

Где $B_{\text{п}}$ – длина плотины по урезу воды в верхнем бьефе при предельном наполнении водохранилища, $H_{\text{п}}$ - напор воды (разница отметок верхнего и нижнего бьефа), а $K_{\text{пр}}$ – некий коэффициент, учитывающий отношении длины плотины к возможной ширине прорыв, который находится из таблицы, приведенной в методическом указании. Также есть возможность определить трансформацию паводка на некотором участке длиной $L_{\text{р}}$. Для этого используется следующая формула

$$Q_{\text{пм}} = \frac{W_0 * Q_{\text{п}}}{W_0 + Q_{\text{п}} * L_{\text{р}} * t} + Q_{\text{м}}(2)$$

Где W_0 –объем воды при наивысшем уровне воды в верхнем бьефе, $Q_{\text{п}}$ –расход воды при прорыве плотины, определяемый по формуле (1), $Q_{\text{м}}$ –возможный бытовой расход воды или расход сброса воды на момент прохождения волны прорыва, t -коэффициент, характеризующий условия прохождения волны прорыва по транзитному руслу и зависящий от его уклона. Таким, довольно упрощенным способом, данная методика позволяет дать приближенные значения характеристик водного потока ($Q_{\text{п}}$) при прорыве грунтовой плотины и дать оценку последствий для территорий затопления, находящихся ниже по течению водотока, на котором находится водохранилище ($Q_{\text{пм}}$). Однако, исходя из вышеизложенной информации об аспектах, которые необходимо учитывать, можно увидеть недостатки данной расчетной методики.

Одним из существенных недостатков данной расчетной схемы заключается в довольно условном учете характеристик прорана. Этот немало важный аспект учитывается эмпирическим коэффициентом $K_{\text{пр}}$ как отношением ширины прорана к длине плотины. При этом этот коэффициент задает строгое неизменяющееся во времени значение для ширины прорана. Однако, в реальности все характеристики прорана, образовавшегося в теле грунтовой плотины, напротив, практически постоянно изменяются во времени за счет движения водного потока, который приводит к отрыву частиц тела плотины и выносу материала. Непрерывность этого процесса при прохождении волны прорыва приводит к тому, что проран становится больше, т.е. увеличиваются

его гидравлические характеристики, такие глубина потока, глубина прорана и, в том числе, ширина прорана. Кроме того, изменение характеристик прорана во многом зависит и от материала самой плотины, а точнее, каким образом идет размыв материала, из которого состоит тело плотины. Расчет характеристик потока, в частности расхода воды, в данном случае рассчитывается с использованием гидравлических формул, которые не учитывают нестационарный, неустановившейся характер движения воды при прорыве.

РД 03-607-03 оперирует куда большим количеством данных и проводит попытку учета изменчивости гидравлических характеристик прорана. Согласно общим положением данная методика позволяет определить следующие показатели, а именно

- Границы зоны затопления
- Время образования, размеры и форму развития прорана
- Расходы и объемы жидких отходов, выливаемых по мере развития прорана
 - Высота, скорость и гидродинамическое давление волны прорыва по пути движения

Расчет условно разделяется на два этапа:

1. Расчет образования прорана и расчет параметров потока в сечении у подошвы откоса дамбы
2. Расчет максимальных параметров потока по трассе растекания

При расчетах допускается, что проран имеет прямоугольное сечение и это сечение постоянно по всей длине прорана. Также после образования прорана жидкость растекается по местности, имеющей естественный уклон, а гидравлический прыжок, возникающий на переходе потока с участка дна больше критического на участок, где уклон меньше критического, не рассматривается. Схема расчета предусматривает возможность получения характеристик прорана в процессе разрушения (первый этап), определение параметров потока в сечении у подошвы откоса дамбы и определение параметров по трассе растекания.

В данной работе интересен именно первый этап расчета по этой методике так как он позволяет получить, согласно положениям методики, время образования, размеры и форму развития прорана. Исходными данными для первого этапа расчета являются зависимость площади и объема водохранилища от отметки заполнения, ширина гребня дамбы, заложения внутреннего и

внешнего откоса, а также плотность частиц грунта, слагающего дамбу, их средневзвешенный размер и плотность вытекающей жидкости. В случае последней, она принимается постоянной и равна 1000 кг/м^3 .

Основные теоретические положения данного руководящего документа также строятся на основе гидравлики и гидродинамике. Расход воды при переливе считается по формуле водослива с широким порогом. Для определения параметров потока в сечении у подошвы откоса за основу используются положения, которые связаны с таким явлением в гидродинамике и гидравлике, как гидравлический прыжок, который подробно описан в [12]. Кроме того, в основу расчетной схемы для определения характеристик прорана входят теоретические положения об устойчивости плотин из грунтовых материалов, которые подробно описаны [4]. Причем, в основу этих теоретических положений лежат теории динамики наносов, которыми подробно занимались Караушев, Макавеев, Колмогоров [5], Мирцхулава [9] и др.

Начальными условиями принято равенство основных параметров, таких как глубина (y_0), ширина (b_0) и глубина потока (h_0) прорана

$$y_0 = h_0 = b_0 = 0,5 \quad (3)$$

Затем задается приращение глубина прорана (Δy) и, относительно него, определяется приращение ширины (Δb).

$$\Delta b = \Delta y * \frac{b_0}{y_0 + \Delta y} \quad (4)$$

Заданные приращения ширины и глубины позволяют определить уменьшение глубины водохранилища (ΔH). Расчет ведется методом итераций и определение гидравлических параметров задается следующими формулами

$$y_i = y_{i-1} + \Delta y \quad (5)$$

$$b_i = b_{i-1} + \Delta b \quad (6)$$

$$l_i = y_i * (m_{\text{отк}} + n_{\text{отк}}) + l_0 \quad (7) \text{ – длина прорана}$$

Кроме того, когда глубина прорана достигает некоторого значения H_{max} - максимальной разницы между отметкой гребня ограждающей дамбы и отметкой, до которой могут вытекать жидкие отходы (м) считается, что увеличение прорана идет преимущественно за счет расширения.

Глубина потока, расход и скорость задаются формулами

$$h_i = \frac{2}{3} * H_i \quad (8)$$

$$Q_i = mb_i H_i^{3/2} \sqrt{2g} \quad (9)$$

$$u_i = \frac{Q_i}{b_i * h_i} = 2.056 * H_i^{1/2} \quad (10)$$

Теперь остановимся более подробно на важном для данной работы моменте, а именно учете связи изменение поперечного сечения прорана и его гидравлических параметров с характеристиками грунта тела плотины и с характеристиками потока. Основной динамической характеристикой потока которая играет ключевую роль при размыве тела плотины, является неразмывающая скорость потока, т.е. такая скорость потока, при которой еще не происходит перемещение частиц. В общем говоря, это некое критическое значение скорости потока. Оно определяется для связных грунтов по следующей формуле:

$$u_{0i} = 1,25 \sqrt{\frac{2gm}{2,6\rho_{ж}n} [(p_s - p_{ж})d_э + 0,044C_{гр}k]} \quad (11)$$

Где $\rho_{ж}$, ρ_s - плотность жидкости и плотность грунта, соответственно, $d_э$ — эквивалентный диаметр отрывающихся отдельностей связного грунта (для супесей – 3 мм, для суглинков – 4 мм, для глин – 5 мм), m – коэффициент условий работы, принимаемый за 1, $C_{гр}$ – нормативная усталостная прочность связного грунта (Па), k – коэффициент однородности, принимаемы за 0,5

$$n = 1 + \frac{d_э}{(0,00005 + 0,3d_э)} \quad (12)$$

Данная формула выведены из формулы Ц.Е. Мирцхулавы на основе экспериментальных данных [9].

На основе этой формулы моно сделать вывод, что неразмывающая скорость потока зависит от диаметра частиц или в данном эквивалентного диаметра отрывающихся отдельностей связного грунта, который обозначается $d_э$. Также основным параметром, влияющим на эту скорость, является усталостная прочность связного грунта на разрыв – свойство данного грунта не разрушаться под воздействием динамических нагрузок, в данном случае под действием воды. Данное соотношение получено на основе лабораторных исследований и является, по сути, эмпирическим, что ставит под сомнения его широкую применимость для различных случаев.

Следующим необходимым расчетным параметром, используемым в данной методике, является гидравлическая крупность – скорость падения (осаждения) частицы в спокойной воде. Подробно вопросы определения гидравлической крупности частиц рассмотрены в книге [5]. В данной методике используются формулы которые довольно близки к соотношению Стокса, приведенные в [5]. В связи с тем, что большинство грунтовых плотин состоит из суглинков или глин, правильнее всего использовать следующее соотношение, рекомендуемое для расчета при $d \leq 0.1$ мм:

$$W_0 = \frac{g d^2 \rho_{ж}}{18 \nu} \quad (13)$$

Где d – средневзвешенный размер частицы (мм), ν – кинематическая вязкость жидкости, равная $0,0101$ см²/с. Данное соотношение близко к тому, которое было получено Д. Стоксом и упоминается в [5].

Следующий аспект данной методики заключается в расчете параметров грунта, слагающих плотину и непосредственно влияющих на скорость размыва плотины и образования прорана. В указанных формулах фигурируют диаметр частиц и плотность. Кроме того, расчет ведется как для связанных, так и для несвязанных грунтов. В частности, используется формула для расчета неразмывающей скорости потока, гидравлической крупности. На основании этих характеристик можно получить значения объема размыва прорана на каждом i -том шаге расчет. Затем рассчитывается транспортирующая способность потока.

Расчет транспортирующей способности потока ведется по следующей эмпирической формуле:

$$\mu_i = 0,01 \left(\frac{u_{кр.i} - u_{0i}}{3W_0} \right)^4 \left(\frac{d}{R_i} \right)^{1,6} \quad (14)$$

Где $u_{кр.i}$ – критическая скорость потока, определяющаяся по следующим соотношением

- При $y < H_{max}$

$$u_{кр.i} = 2,63 * h_i^{0.5} \quad (15)$$

- При $y \geq H_{max}$

$$u_{кр.i} = 3,77 * h_i^{0.2} \quad (16)$$

Анализ этой формулы позволяет определить, что транспортирующая способность потока напрямую зависит от скоростных характеристик потока

($u_{кр}$ и u_0) и гидравлической крупности (обратная взаимосвязь) и гидравлического радиуса. Принцип построения расчета транспортирующей способности строится на основе эмпирических зависимостей, описанных в [5]. Обобщенная формула для расчета этой характеристики указана в [5] и выглядит следующим образом:

$$S_{cp} = k * \frac{u^m}{H^n * W^n} \quad (17)$$

где S_{cp} —средняя мутность потока, отвечающая его транспортирующей способности; v — скорость потока; W — средняя гидравлическая крупность наносов, находимая по заданному гранулометрическому составу наносов при учете процентного содержания фракций; H —глубина потока; численные значения показателей степени m и n , а определяются по эмпирическим данным [5].

На основании всех полученных расчетных характеристик можно получить i -тый объем воды ΔV_i , который вытекает из водохранилища, по следующей формуле:

$$\Delta V_i = Q_i \Delta t_i = \frac{2 \rho_d \Delta W_i}{\mu_i} \quad (18)$$

Остановимся на вышеуказанной формуле. Подробный анализ позволяет сделать вывод, что объем i -тый объем воды, вытекающий из водохранилища зависит (обратная взаимосвязь) от транспортирующей способности потока и напрямую связан с объемом материала ΔW_i , который вынесен из прорана и находится по:

$$\Delta W_i = W_i - W_{i-1} = 0,5(b_i y_i l_i - b_{i-1} y_{i-1} l_{i-1}) \quad (19)$$

Физический смысл зависимости изменения объема водохранилища от объема материала ΔW_i , который вынесен из прорана, заключается в том, что данная характеристика показывает изменение прорана во времени, а точнее изменения параметров его сечения (глубина (y_0), ширина (b_0) и глубина потока (h_0)).

Однако, данное соотношение вызывает ряд вопросов относительно того, каким образом обоснована взаимосвязь вытекающего объема воды от транспортирующей способности. Согласно указанной зависимости, чем больше транспортирующая способность потока (максимальное количество наносов, которое способен переносить поток при данных гидравлико-морфометрических характеристиках русла (кг/с)), тем меньше i -тый объем воды ΔV_i . Однако расход наносов, коим является транспортирующая способность потока, напрямую

зависит от количества выносимого материала и от расхода воды в проране (чем больше расход воды, тем больше расход наносов). Кроме того, транспортирующая способность потока также напрямую зависит и от динамических характеристик потока, частности от скорости воды. Поток воды, которая сбрасывается из водохранилища при переливе и прорыве тела плотины, обладает значительными скоростями. Сброс воды происходит в течение небольшого количества времени, и объемы сбрасываемой воды могут довольно большими. Т.е., исходя из этого можно сделать вывод о том, что в реальном процессе прорыва плотины связь между транспортирующей способностью потока и объемом воды, сбрасываемом при прорыве, должна быть прямой. Это же соотношение, во многом определяет то, каким образом изменение прорана влияет на изменение объема и уровня в водохранилище, однако не показывает влияние потока из водохранилища на изменение прорана.

Расчет ведется до тех пор, пока значение объема не достигнет некоторого максимального значения, которое может соответствовать объему самого водохранилища, либо же пока величина транспортирующей способности не становится 0,003.

Из недостатков данной методики можно выделить следующие аспекты. К первому недостатку следует отнести предположение о прямоугольном сечении. В действительности, при размыве сечение будет иметь изначально треугольную форму, а затем трапециевидную. Данное предположение неоправданно, исходя из гидравлически выгоднейшего сечения (сечения, которое при прочих равных условиях способно пропустить максимальный расход воды). При размыве в теле плотины образуется воронка треугольного сечения [10], которая по мере увеличения как вширь, так и вглубь приобретает черты трапеции. Также непонятно наличие условие, которое касается достижения отметки H_{max} . Не совсем ясно каким образом задается эта отметка, ведь известны случаи практически полного опорожнения водохранилища. При этом глубина потока может достигать практически дна самого водохранилища. Возможно, в данном случае логичнее задавать данную характеристику, как разницу между отметками нижнего и верхнего бьефа. Однако, каким образом учитывать данное условие при незначительном прорыве остается неясным.

Ко второму недостатку можно отнести тот факт, что итеративные расчеты характеристик прорана и характеристик грунта идут обособленно друг от друга. Поток воды, проходящий через сечение прорана несомненно будет размывать тело плотины, увеличивая ширину и глубину прорана. Также изменение характеристик прорана влияют на спуск воды из водохранилища. С одной стороны, движение воды, начинающееся с перелива и постепенного размыва тела плотины путем интенсивного размыва. С другой стороны, постепенное

увеличение прорана увеличивает спуск воды из водохранилища. Однако, в данной методике этот факт практически не учитывается. Кроме того, следует отметить довольно условный расчет приращения значений характеристик. Приращение глубины и ширины прорана задается постоянным, что, во многом, неверно, так как с увеличением скорости потока и расхода, увеличиваются размыв. В связи с этим следует говорить об обоснованной зависимости морфометрических характеристик прорана от потока, в частности, от таких его динамических характеристик, которые непосредственным образом влияют на размыв грунта. При этом также следует отметить и то, что изменение их будет зависеть от сопротивления грунта размыву.

Касаясь расчета характеристик грунтов относительно потока (гидравлическая крупность, неразмывающая скорость и т.д.) следует учесть тот факт, что большинство этих формул являются преимущественно эмпирическими и основаны на лабораторных данных. Значения некоторых коэффициентов, полученных лабораторным путем, могут в разы отличаться от того, что в действительности. Данные формулы получены для конкретных, заданных в ходе экспериментов условиях, и отражают лишь частные случаи проявления процесса, что делает их далекими от реальности. Однако, это скорее необходимость, нежели недостаток, так как чего-то иного на данный момент нет.

Параллельно существующим методическим рекомендациям и руководящим документам существуют также полноценные научные исследования и статьи, посвященные данному вопросу. Данные труды пытаются раскрывать все аспекты процесса прорыва грунтовой плотины, а также формировать на основе анализа расчетные методики для оценки параметров прорана. Также довольно часто производятся попытки моделирования процесса при помощи современных моделирующих систем.

В статье [10] была предложена одна из таких расчетных методик, основанная на теоретическом подходе и физическом моделировании процесса. Прежде всего были приведены основные особенности прорывов, основанные на анализе реальных случаев и статистических данных:

- Время прорыва прорана варьируется от 0,5 до нескольких часов;
- Размыв происходит до глубины основания;
- Заложение откосов прорана близко к соотношению 2:1;
- Оценка развития прорана, в общем, не зависит от конструктивных особенностей плотины [10].

Основная математическая зависимость, которая в теории должна давать оценку характеристикам прорана выглядит следующим образом [10]:

$$\frac{dB}{dt} = C * \frac{g^{0.5} * h_t^{2.5}}{w_{уд}} * \left(\frac{w_{уд}}{h_t^2}\right)^n * \left(1 - \frac{h_n}{h_t}\right)^p \quad (20)$$

Где dB/dt – интенсивность расширения прорана во времени; g – ускорение свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$; h_t – разность между уровнем воды в водохранилище и отметкой дна прорана (действующий напор); $w_{уд}$ – площадь поперечного сечения плотины; h_n – напор, соответствующий неразмывающей скорости. (Эмпирический коэффициент C и показатели степеней n и p определяли на основании экспериментальных данных).

Далее в статье приводилось описание экспериментальной установки, на которой проводилось физическое моделирование. Модель представляла из себя грунтовую плотину из кварцевого песка разного состава (мелкодисперсного со средней крупностью $0,15 \text{ мм}$ и разнородного среднезернистого – $0,22 \text{ мм}$) $30, 45$ и 60 см в высоту и с двумя типами заложения откосов: $1:3, 1:2$. На экспериментальной установке производили наблюдения за уровнями воды, расходами из прорана и его размерами.

Эксперимент позволил выявить стадийность процесса образования и развития прорана. Согласно [10] на первой стадии размыв начинается на низовой грани, где поведение потока идет по кривой спада и происходит переход к равномерному движению. Затем постепенно, после достаточного размыва низовой грани, эрозии поднимается вверх по плотине до гребня. На гребне образуется ложбина (проран), которая, по мере увеличения напора и сброса воды, увеличивается вплоть до самого основания, причем как за счет выноса материала со дна ложбины, так и за счет обрушения откосов. На второй стадии начинается увеличение прорана по ширине, которое связано с обрушением боковых откосов. В процессе размыва потоком основания откоса последний теряет свою устойчивость, и масса грунта обрушается. При этом часть этого грунта переотлагается в нижнем бьефе, а часть осаждается в самом проране.

Сравнительный анализ рассчитанных по вышеуказанной зависимости и фактических (экспериментальных) ширин, которые были приведены в [10], а также отношение фактической ширины к рассчитанной показывают, в общем-то, близкие значения, что доказывает актуальность использования данного соотношения для оценки ширины прорана.

Автором приведена также и расчетная методика, основанная на исследовании, которая позволяет оценивать не только характеристики прорана, но и расходы излива через проран. Методика включает следующие уравнения:

- Уравнения 1: Ширина прорана в момент времени t ;

$$B_t = C * \sqrt{g} \int_0^t \frac{h_t^{4.5}}{w_{уд}^2} * \left(1 - \frac{h_n}{h_t}\right)^{0.3} * dt \quad (21)$$

- Уравнение 2: Расход излива воды через проран в момент времени t ;

$$Q_{изл. t} = -\frac{dW_t}{dt} = m * \varepsilon * \sigma_n * B_t * \sqrt{g} * h_t^{3/2} \quad (22)$$

Где m – коэффициент водослива, ε – коэффициент бокового сжатия, σ_n –коэффициент подтопления.

- Уравнение 3: Объем воды в водохранилище в момент времени t ;

$$W_t = W_0 - \int_0^t (Q_{изл.t} - Q_{пр.t}) * dt \quad (23)$$

Где W_0 – объем водохранилища до начала излива, $Q_{пр.t}$ –расход приточности в водохранилище в момент времени t .

- Уравнение 4: Зависимость объема в водохранилище от уровня верхнего бьефа;

$$W_t = k * h_t^m \quad (24)$$

Показатель степени m в зависимости от рельефа измениться от 1 до 4. Значения коэффициента k при известном значении m может быть определен в зависимости от начальных значений W_0 и h_0 .

- Уравнение 5: Уровень воды в верхнем бьефе;

$$УВБ_t = V_{осн} + h_t \quad (25)$$

Где $V_{осн}$ – отметка основания плотины.

Следует отметить, что данная работа подходит куда более основательно к вопросу изменчивости характеристик прорана. Полученное соотношение оперирует динамическими характеристиками потока, которые играют важную роль при размыве прорана. Однако же, в данном соотношении не фигурируют характеристики сопротивления грунта, что не позволяет с полной уверенностью утверждать, что полученные результаты соответствуют реальному процессу размыва прорана в теле плотины. Также уравнения 2 описывает лишь случай установившегося движения воды, что не совсем верно в связи с тем, что прорывной паводок имеет неустановившийся режим движения.

За рубежом также довольно много работ посвящено вопросу прорыву грунтовых плотин. В частности, интересна следующая работа, являющаяся диссертацией по теме Dam Break Modelling, Risk Assessment and Uncertainty Analysis for Flood Mitigation [18]. В ней описан процесс развития прорана во времени и пространстве. Изменение во времени происходит следующим образом: за начало разрушения плотины принято считать появление первых утечек через тело плотины или в обход нее. На начальном этапе отток воды из водохранилища невелик, и есть возможность остановить разрушение плотины. Непосредственно развитие прорана начинается в момент, когда появилась ложбина, и заканчивается в момент, когда проран достиг своего максимального размера. В работе выделено, что в процессе сброса воды через проран расходы воды и эрозия чрезвычайно велики, при этом вероятность остановить процесс не представляется возможным. Остановить процесс разрушения плотины возможно лишь на начальных этапах. Кроме описания процесса разрушения плотины, в работе [18] выделены важные факторы, которые влияют на процесс развития прорана. В частности, отмечается значительная роль свойств грунта, слагающих тело плотины, такие как связность, уплотнение (связано с тем, как в период строительства плотины уплотнялся грунт). Также немало важное влияние на процесс прорыва плотины оказывает влияние поток (расписать красиво, как именно). На механизм формирования прорана по мнению автора [18] влияет эрозия, которая приводит непосредственно к размыву гребень плотины, и эрозия, приводящая к размыву внешнего откоса плотины (headcut erosion). Другим довольно важным вопросом является то место, в котором (по гребню плотины) образуется проран. Расположение прорана довольно сложно прогнозировать, так как оно зависит от технических свойств прорана по отношению к потоку. Обычно проран образуется в местах, где нарушена структура (плохо уплотнен материал, к примеру). Также во многом месторасположение зависит от характеристик потока.

В данной работе описывается большое количество подходов к описанию процесса и оценке характеристик. Кроме того, автором предложена также модель, называемая BREADA (Breaching Earthfill DAM), которая должна позволить рассчитывать разрушение плотины вследствие переполнения водохранилища и перелива. Первоначальным условиям для прорана считается его форма. В модели предусмотрен выбор либо изначально трапецеидального сечения, либо треугольного, которое потом развивается в трапецеидальное. При этом процесс развития и в том и в другом случае схож: проран размывается до глубины основания плотины, а затем разрастается вширь. В связи с невозможностью прогнозирования месторасположения начального прорана он задается в центральной части гребня. Изменение объема в водохранилище задается следующим образом:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_b - Q_c - Q_{outlet} \quad (26)$$

Где Q_{in} , Q_b , Q_c , Q_{outlet} – поток из водохранилища, поток через начальное сечение прорана, поток в проране по гребню плотины, поток через замыкающее сечение прорана, соответственно.

Перенос материала потоком рассматривается как во взвешенном, так и во влекомом состоянии. Размыв материала рассчитывается по зависимости предложенной Мейер-Петером и Мюллером (Meyer-Peter and Muller). Записывается она следующим образом:

$$q_{bl} = \varphi_b * [(s - 1) * g]^{1/2} * d_m^{1/3} \quad (27)$$

Где s – отношение плотность грунта к плотности воды ρ_s/ρ , d_m – средний диаметр частиц, φ_b – транспорт влекомых наносов, выраженный в безразмерной форме, который рассчитывается следующим образом

$$\varphi_b = 8 * (\mu * \theta - \theta_{cr})^{3/2} \quad (28)$$

Где θ_{cr} – критический параметр подвижности наносов, принимающийся обычно за 0,047, θ – параметр подвижности, рассчитываемый по формуле

$$\theta = \frac{RI}{(s - 1) * d_m}, \quad (29)$$

μ – коэффициент форму русла.

Предполагается, что изменение поперечного сечения прорана во времени зависит от изменения q_{bl} .

$$\frac{dA_b}{dt} = \frac{dq_{bl} * c}{dt} = q_{bl} * c \quad (30)$$

Где c – смоченный периметр.

Предполагается также, что начальные условия - глубина воды в водохранилище, начальный размеры прорана и гидрограф притока - известны. Для каждого временного шага поток через гребень, через водосброс и сброс воды рассчитывается на основе отметки верхнего бьефа

Разница между притоком и оттоком затем используется для расчета изменения объема воды в водохранилище.

В качестве примера алгоритма расчета будет приведен расчет для трапецеидального сечения прорана. Развитие прорана идет в вертикальном и

направлении и вширь до тех пор, пока не будет достигнута отметка основания плотины. Поперечное сечение прорана задается по следующей формуле:

$$A_b = B * (H_d - y) + \frac{(H_d - y)^2}{2} * (\tan \beta + \tan \delta) \quad (31)$$

Где B – ширина прорана по глубине. Изменение поперечного сечения потока во времени, исходя из предыдущего уравнения, рассчитывается следующим образом:

$$\frac{dA_b}{dt} = \frac{dA_b}{dy} * \frac{dy}{dt} = [B * (H_d - y) + (\tan \beta + \tan \delta)] * \frac{dy}{dt} \quad (32)$$

Расход воды через проран является критическим и рассчитывается по следующему соотношению:

$$Q_b = \left(\frac{g}{B + h_c(\tan \beta + \tan \delta)} \right)^{1/2} * \left[\frac{(2B + h_c(\tan \beta + \tan \delta)) * h_c}{2} \right]^{3/2} \quad (33)$$

$$h_c = \frac{-3B + 2(H - y) * (\tan \beta + \tan \delta) + R^{1/2}}{5 * (\tan \beta + \tan \delta)} \quad (34)$$

Параметр R в данном случае рассчитывается по следующей формуле.

$$R = 9 * B^2 + 8 * B * (H - y) * (\tan \beta + \tan \delta) + 4(H - y)^2 * (\tan \beta + \tan \delta) \quad (35)$$

5)

Изменение глубины прорана, исходя из предыдущих уравнений, записывается следующим образом:

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{k_{er}}{k^3} * \frac{(\gamma * g)^{3/2}}{2} * \frac{(2B + h_c(\tan \beta + \tan \delta)) * h_c}{B * (H_d - y) + (\tan \beta + \tan \delta)} * \left(\frac{B + h_c \left(\frac{1}{\cos \beta} + \frac{1}{\cos \delta} \right)}{B + h_c(\tan \beta + \tan \delta)} \right) \quad (36)$$

В случае если $\beta = \delta$ зависимость между вертикальной и продольной эрозией записывается как

$$\frac{\Delta B}{\Delta y} = const \quad (37)$$

Где AB и Lu представляет собой изменение ширины поперечного сечения и его глубины.

Валидация модели проходила с использованием данных по историческому прорыву дамбы Шаффера (Schaffer Dam), США. Использование модели в реальных условиях осуществлялось на основе гипотетического прорыва плотины Бовилла (Bovilla Dam) на реке Теркузе (Terkuze River) в 15 км к северу-востоку от города Тирана. В результате были получены гидрографы истечения воды из водохранилища. Сравнение полученных пиковых значений с результатами, полученными по эмпирическим формулам.

Из плюсов данной модели стоит отметить то, что она дает гидрографы истечения воды через проран. При этом характеристики прорана также учитываются при расчетах расходов воды. Что же касается самих характеристик, стоит сказать, что принципы, заложенные в их расчет, имеют куда более обоснованные принципы, чем в предыдущих примерах методик. Позиции, с которой рассматривается изменения характеристик прорана, связаны преимущественно с динамикой наносов. Однако следует отметить, что большинство уравнений, используемых в модели, имеют эмпирический вид.

Существуют также методики, основанные на стохастическом подходе. В частности, в работе [14] проводится исследование устойчивости грунтовых плотин с использованием статистического метода конечных элементов совместно. Использование этого метода происходит совместно с принципом снижением прочности грунта (strength reduction method – SRM). В основу принципа входит снижение эффективных значений прочности на сдвиг до момента, пока система не перейдет в неустойчивое состояние. В данном случае, устойчивость склонов во многом зависит от степени обводнения склонов. Анализ устойчивости может производиться 2 способами:

- Расчет напряжений/деформаций производится независимо друг от друга. В этом случае в гидравлическую модель конечных элементов (КЭ) в качестве начальных условий входит параметры уровня насыщения грунта, порового давления. А расчеты ведутся относительно эффективных напряжений.
- Расчет в случае, когда связь между напряжениями и деформациями сильна. Расчет в этом случае гораздо сложнее и требует куда больше вычислительных мощностей, потому что вычисление включает в себя как расчет просачивания, так и расчеты деформаций.

Большинство параметров, которые описывают свойства грунтов, из которых строятся плотины, довольно значительно варьируются. Поэтому эти параметры также анализируют как поле случайных величин. Для этого используют методы стационарных случайных полей Гаусса. Входные данные для модели, а именно характеристики устойчивости грунтов, избавляются от пространственной неопределенности путем использования этого метода. Затем эти параметры используются при расчетах и анализе одним из двух вышеуказанных способов. Результаты затем анализируются на основе некоего индекса устойчивости (Factor of Safety – FoS). Данный фактор является степенью уменьшения сдвиговой прочности по отношению к возникающим силам, стремящимся нарушить устойчивость склона. Данная величина обозначается F и входит в следующее уравнения:

$$c'_{red} = c' * F * \varphi'_{red} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \varphi'}{F} \right) \quad (38)$$

Где c' и φ' – параметры сдвиговой прочности.

Симуляция ситуаций для 3 типов конфигурации плотин показывала удовлетворительные результаты. Так для плотин были рассчитаны довольно высокие индексы устойчивости в нормальной ситуации. При этом, нарушения, которые могут влиять на устойчивость, а также конкретные особенности тех или иных грунтов могут влиять на разброс устойчивости по телу плотины. Тем не менее, показатели устойчивости, полученные при помощи этой модели, оказались близки к детерминированным [14].

Из плюсов данного подхода можно выделить то, что производится попытка учета свойств грунта. Также следует отметить, что подобные модели можно использовать при инженерной оценке плотины, а также при прогнозировании возможных прорывов. Однако, не рассматривается вопрос того, как именно происходит влияние того или иного фактора на устойчивость. В частности, нет возможности спрогнозировать возможность перелива, и то насколько это может повлиять на грунтовую плотину. Этой возможности нет в связи с тем, что пока этот метод дорабатывается.

Следующая группа методов связана со сложным гидродинамическим численным моделированием, основанным на системах уравнения в частных производных. Большинство этих систем уравнений связаны с уравнением Навье-Стокса, которое описывает неустановившееся движение воды, и являются его частными случаями, также в эти системы входит уравнения сохранения массы (уравнение неразрывности) (Рисунок 1 и Рисунок 2).

Кроме того, в данную систему также входит блок, который рассчитывает процесс эрозии в проране, как процесс переноса наносов [17]. В частности, одним из таких примеров является модуль, указанный в работе [17].

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right). \end{aligned}$$

Рисунок 1 - Уравнение Навье-Стокса

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0$$

Рисунок 2 - Уравнение неразрывности потока

Для него составлено уравнение сохранения массы для движения наносов

$$\frac{dQ_s}{dx} + (1 - p) * B * \frac{d\tau}{dt} = 0 \quad (39)$$

Где p – пористость грунта дна, B – смоченный периметр, τ – координата дна, Q_s – расход наносов. Единичный расход наносов q_s при этом является функцией нескольких переменных (скорость u , глубина потока h , размер частиц d , коэффициент шероховатости n):

$$q_s = f(u, h, d, n \dots etc) \quad (40)$$

Использование таких сложных моделей требует большого количества точных и увязанных входных, что в некоторых случаях практически невозможно, например, для случаев малых водохранилищ. Кроме того, следует отметить, что в данном случае для расхода наносов предложена модель

«черного ящика», что также не позволяет точно описывать процесс изменения характеристик прорана.

Разумеется, это лишь неполный перечень моделей и расчетных методов, которые используются для оценки характеристик прорана и максимальных расходов при переливе грунтовой плотины. Однако данный обзор позволяет в достаточной мере проследить современную ситуацию. Анализ нескольких примеров существующих методик позволяет получить приблизительную информацию о том, какие теоретические положения и концепция, по мнению создателей, отражают реальную суть процесса, а также произвести критическую оценку этих положений, выявить плюсы и минусы данных положений и концепций. В дальнейшем, в процессе развития данной тематики, полученные выводы могут позволить сформировать иную теоретическую концепцию, которая опирается на сильные стороны проанализированных методик и моделей и отмечает слабые.

В обзоре подробное внимание уделено «Методическим рекомендациям по определению расходов воды при проектировании переходов через водотоки в зоне воздействия некапитальных плотин» и «Методическим рекомендациям по расчету развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов» как примерам руководящих документов при инженерном проектировании и оценке в России. Ниже в данной работе будет представлено использование данных методик на конкретных примерах и сравнение полученных результатов с наблюдаемыми данными, чтобы определить состоятельность использования расчетных методик при проектировании и оценке подобного рода явлений.

Глава 2. Обзор объектов исследования

Водоохранилища, подпруженные грунтовыми плотинами, довольно распространены по всему земному шару, так как они довольно дешевы с точки зрения строительства. Но есть и другая сторона данного вопроса: на подобных водоохранилищах имеется потенциальная опасность перелива и последующего прорыва грунтовой плотины вследствие ее ненадёжности.

В качестве объектов исследования в данной работе были использованы случаи катастроф на водоохранилищах с грунтовыми плотинами, причиной которых стало перелив. В Таблице 1 приведены список водоохранилищ, бассейны рек, на котором они сооружены, страны, в которых они находятся и координаты. Также эти водоохранилища отмечены на карте (Рисунок 1).

Таблица 2 - Водохранилища, на которых наблюдались прорывы

Водохранилище	Бассейн	Страна	Координаты
Кокпектинское	р. Кокпеты	Казахстан	49°55'с.ш. 73°19'в.д.
Тирлянское	р. Тирлян	Россия	54°12' с.ш. 58°34' в.д.
Бельцы	р. Тазлау	Румыния	46°17' с.ш. 26°45' в.д.
Киселевское	р. Каква	Россия	59°35'с.ш. 60°34' в.д.
Мачху-2	р. Мачху	Индия	22°45'с.ш. 70°52' в.д.
Шади Кор	р. Шади	Пакистан	25°31'с.ш. 63°24' в.д.
Ка-Лока	-	Гавайи, США	22°10' с.ш. 159°22'з.д.
Озеро Мидоу	-	США	43°27' с.ш. 71°14'з.д.
Озеро Тимбер	Буффало-Крик	США	37°18'с.ш. 79°16'з.д.
Ситу Гинтунг	-	Индонезия	6°18' ю.ш. 106°46' в.д.

Кокпектинское водохранилище, р. Кокпеты, Казахстан. Катастрофа произошла в ночь на 31 марта 2014 года. Полный объем водохранилища составляет 1,5 млн. м³, площадь зеркала 0,4 км² (Рисунок 2.1). Высота плотины составляет 18 м, превышение между отметкой верхнего и нижнего бьефа 10 м, длина плотины по гребню составляла 940 м. Согласно данным ЧС Карагандинской области (статья из новостного портала «Караганда онлайн»), основной причиной могли стать нарушения в эксплуатации водохранилища и дамбы. Было установлено, что до прорыва в водохранилище, в ходе прохождения по половодья, которое сопровождалось чрезвычайно быстрым аномальным таянием снега из-за внезапного потепления в бассейне р. Кокпеты, поступило более 7 млн. м³ воды, что в 4 раза больше объема самого водохранилища. При этом планы мероприятий в случае значительных паводков отсутствовали, а наблюдение за уровнем воды не осуществлялось, так как не было постоянного водомерного поста и наблюдения за уровнями воды не проводились. Также водосбросные сооружения, находившееся на

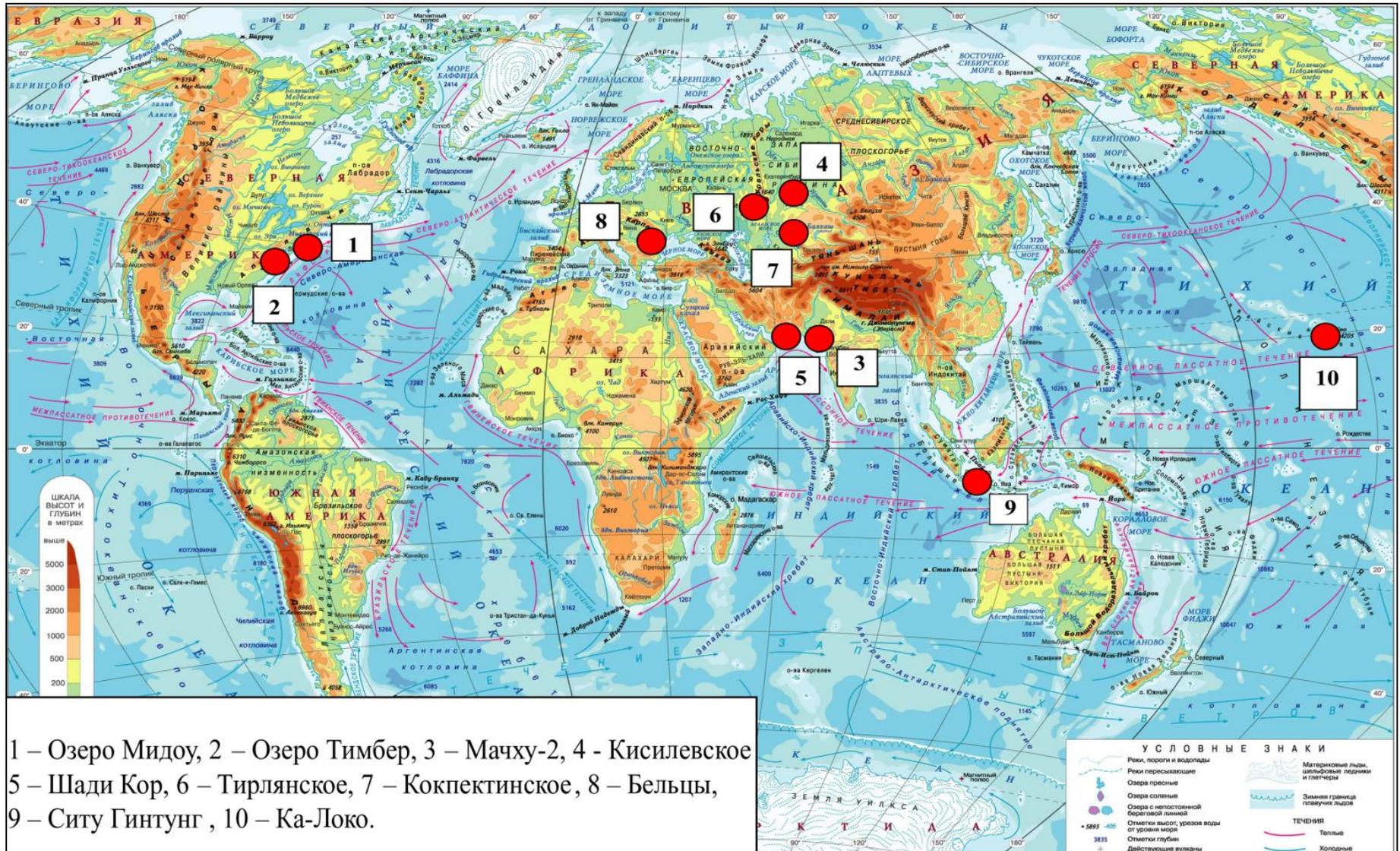


Рисунок 1 - Карта мира с помеченными водохранилищами.

плотине были в аварийном состоянии. Нарушения в теле плотины как причина прорывного паводка исключаются, так как не было обнаружено каких-либо отклонений в плотности грунтов. Отсутствие изначальных проектных материалов не позволяет оценить характеристики водохранилища. В результате прорыва водохранилище было полностью опорожнено, а ширина образовавшегося прорана составила 62 м (Рисунок 2.2 и Рисунок 2.3).



Рисунок 2.1 - Кокпектинское водохранилище до прорыва 2014 года.



Рисунок 2.2 - Кокпектинское водохранилище после прорыва 2014 года.



Рисунок 2.3 - Проран, образовавшийся в результате перелива 2014 года.

Тирлянское водохранилище, р. Тирлян, Россия. Разрушение Тирлянской грунтовой плотины произошло 7 августа 1994 г. Высота плотины составляла 9,85 м, длина по гребню 400 м, полный объемом 4,96 млн. м³. Причина катастрофа связана с тем, что водопропускные сооружения не справлялись с пропуском столь больших объемов воды. Пропускная способность полностью водосбросных сооружений при НПУ составляла 290 м³ при расчетном расходе 1% обеспеченности 300 м³ /с, что соответствовало нормам. За 5 лет до катастрофы, 1989 году проводилось водолазное обследование, которое обнаружило дефекты в основании плотины: разрушение бетона в основании водосброса и водозабора, образование полости размером 0,4 x 1 м под бетонной плитой, а в основании промежуточного бычка – трещины длиной 15 м. Эти дефекты не были устранены к августу 1994 г., в момент прохождения дождевого паводка. Необеспеченность пропуска через водосбросы поступающего расхода привела к переполнению водохранилища, переливу воды через плотину на участке водосбросов. Разрушение грунтовой плотины с образованием прорана шириной 20 – 25 м (по другим данным до 80 м) по всей высоте плотины произошло вследствие размыва ее тела переливающимся через плотину потоком. При прорыве были затоплены пос. Тирляни ряд других

населенных пунктов, погибли 22 человека, убытки превысили 40 млрд. руб. (цены августа 1994 г.) [2].

Оз. Ситу Гинтунг, Индонезия. Данное водохранилище было образовано плотиной высотой 16 метров и имело объем в 2 млн. м³ (Рисунок 3.1). Оно было построено с целью орошения рисовых полей, однако затем территория была отдана под градостроительство. Катастрофа случилась в ночь с 26 на 27 марта 2009 года. Вследствие проливных дождей водохранилище оказалось переполненным, и произошел перелив через гребень плотины. В результате прорыва образовался прорана шириной 70 м. Волна воды и мусора высотой 3 м направилась в Чирендеу, где вызвало затопление территории. Максимальный расход воды, которая устремилась в город, составил 425 м³/с. Уровень затопления территории составил 2,5 м. В результате наводнения погибло 98 человек, оказались затопленными 400 домов, а озеро было полностью опорожнено [15] (Рисунок 3.2).

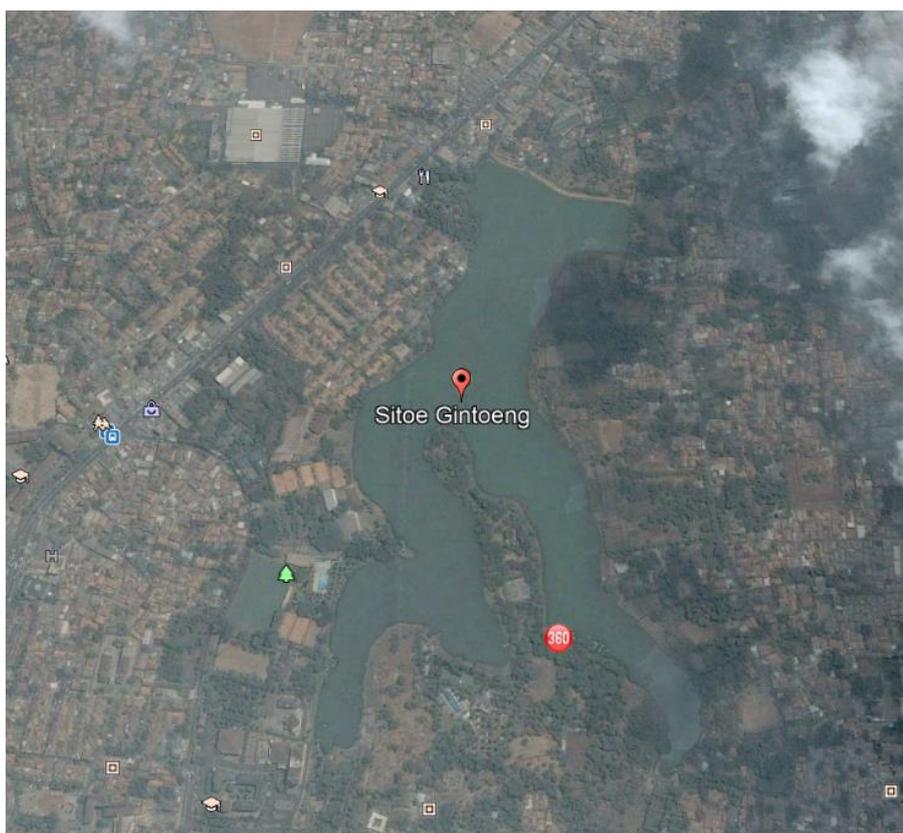


Рисунок 3.1 - Озеро Ситу Гинтунг до катастрофы 27 марта 2009 года.

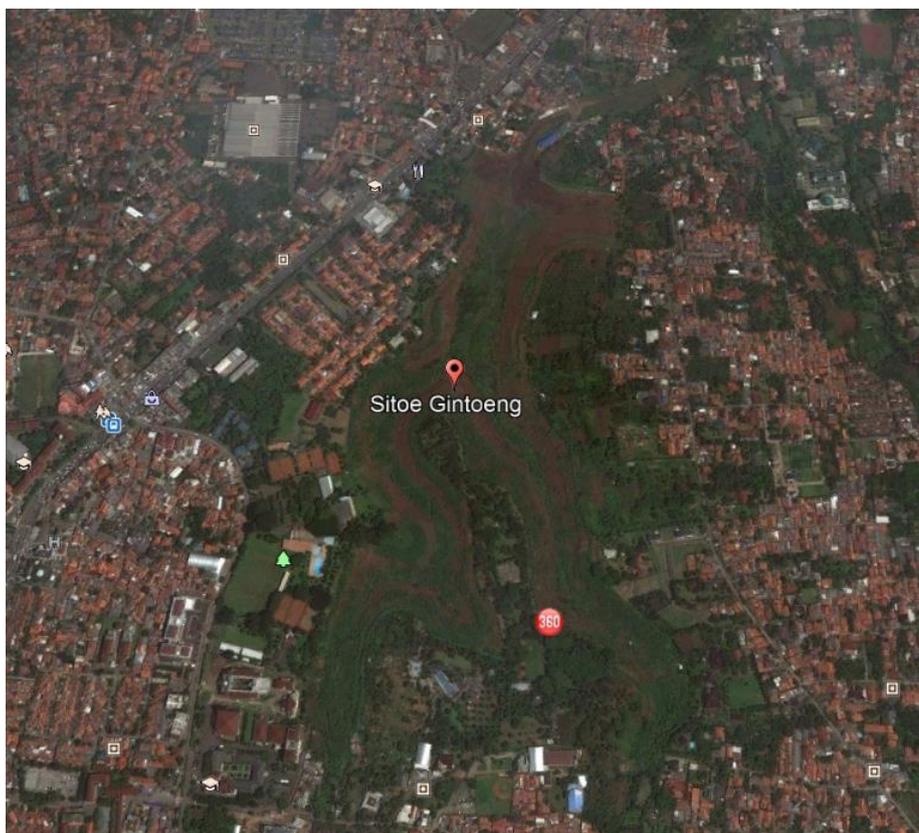


Рисунок 3.2 - Озеро Ситу Гинтунг после катастрофы 27 марта 2009 года.

Бельцы, р. Тазлау, Румыния. Плотина на реке Тазлау была построена в 1962 году недалеко от Слобозии в Румынии. Высота плотины составляла 18 м, длина по гребню 432 м, а вместимость резервуара составляла 13 млн. м³. Интересен тот факт, что до 1991 года, за 29 лет эксплуатации происходили наводнения, вызывавшие переполнение водохранилища и датируемые 1970, 1971 и 1979 годами. После данных наводнений был произведен пересчет возможных паводков для водохранилища, однако сама конструкция водохранилища и его объем не менялись, так как были снижены [16]. Наиболее крупное и серьезное наводнение случилось 28 июля 1991 года. В результате сильных дождей было нарушено электроснабжение и телефонные линии. Первое привело к невозможности нормального функционирования водосбросных сооружений, а второе исключило возможность оповещения населения о возможной катастрофе. Нарушение в работе водопропускных сооружений привело к переполнению водохранилища и переливу через плотину. Пиковый расход составил 1200 м³, а размеры образовавшегося прорана составили 112 м в ширину и 15 м в глубины. Водоохранилище было опустошено за 5 часов. В результате наводнения 119 домов были полностью разрушены и 25 человек было убито [16].

Киселевское водохранилище, р. Каква, Россия. Одна из самых крупных катастроф в России. Данное событие случилось 14 июля 1993 года в районе города Серова Свердловской области. Высота грунтовой плотины составляла 18 м, а длина по гребню 1920 м. Полный объем водохранилища составлял 32 млн. м³. Основной причиной перелива через гребень плотины являлась недостаточность пропускной способности водосбросных сооружений. Водосбросы были рассчитаны на пропуск паводков повторяемостью 0,001% обеспеченности (1 раз в тысячу лет), равных 560 м³/с. Однако, согласно фактическим замерам, на момент перелива, приток в резервуар составлял 1000 м³/с и продолжал расти [2]. В результате паводка почти 70 км² территории было затоплено, общий ущерб составил 63 млрд. руб. (1993 год) [2] (Рисунок 4).



Рисунок 4 - Прорыв Киселевского водохранилища (1993 г.).

Шади Кор, р. Шади, Пакистан. Катастрофическое наводнение произошло 11 февраля 2005 года в провинции Белуджистан (Рисунок 5.1 и Рисунок 5.2). Произошел прорыв плотины ГЭС Шади Кор длиной 485 м и высотой 25 м недалеко от города Пасни. Паводок случился из-за аномальных осадков. Согласно (ссылка на статью новостей), по метеостанции Джавани (Givani) было зафиксировано 130 мм осадков, что являлось максимум за последние 33 года. Погибли более 100 человек, пропали без вести 700 человек.



Рисунок 5.1 - Плотина Шади-Кор до катастрофы 11.02.2005 г.



Рисунок 5.2 - Плотина Шади-Кор до и после катастрофы 11.02.2005 г.

Ка-Лока, Гавайи, США. Ка-Лока – водохранилище, расположенное на острове Кауаи (Рисунок 6), штат Гавайи, США. Высота плотины составляла 12 м, длина по гребню 25 м. Площадь зеркала резервуара покрывает 5,7 млн км² километров, а объем рассчитан на 300-400 млн. галлонов воды (1,1 – 1,5 млн. м³). Катастрофическое наводнение случилось 14 марта 2006 года и было вызвано переливом через плотину, которое, в свою очередь, связано с аномальными дождями, которые наблюдались в то время. В результате прорыва плотины было сброшено порядка 300 млн. галлонов воды (1,1 млн. м³) воды, которые вызвали волну высотой от 20 до 70 футов (6-20 м) и шириной до 200

футов (61 м). Максимальный расход, который наблюдался на шоссе Кухио (3 км ниже по течению) составлял 770 м³/сек. Кроме осадков также есть и иная причина. Независимое расследование отметило нарушение эксплуатации плотины, которые могли бы вызвать данную катастрофу. В частности, владелец плотины Ка-Лока проводил незаконную чистку, что, вероятно, могло привести к засорению одного из водосбросов [15].



Рисунок 6 - Водохранилище Ка-Лока, о. Кауаи, Гавайи, США.

Озеро Мидоу, США. Пруд находился в городе Алтон, Нью-Гемпшир. В начале 1990-х годов было принято решение увеличить пруд для рекреационных целей, для чего была построена плотина длиной 142 м и высотой 36 м. В результате площадь водоема 182 тыс. м², а объем до 350 тыс. м³. 13 марта 1996 был обнаружен проран величиной в 3 фута (0,91 м). Прорыв случился вечером и в результате него был сброшен весь объем воды в пруду. Последующее расследование выявило, что причиной данного инцидента послужило конструкционные ошибки, в частности то, что плотина не в достаточной мере учитывала условия холодной погоды [15].

Озеро Тимбер, Буффало-Крик, США. Катастрофа случилась 22 июня 1995 года. Дамба была построена на реке Буффало Крик в рекреационных целях и к моменту катастрофы берега были густо заселены. Дамба была 10 м в высоту и около 150 м в длину по гребню. Полный объем озера составлял 1,8 млн. м³, площадь зеркала 303 тыс. м². Основной причиной перелива воды через гребень послужило обильное выпадение осадков. По радарным измерениям выпало порядка 300 мм осадков. Озеро после прорыва было опустошено полностью примерно за час, был сброшен весь объем находящейся в нем воды. Максимальный расход (с учетом того, что максимальный пик оттока был в два раза среднего в течение часового опорожнения озера) составлял 990 м³/с, а ширина образовавшегося прорыва составляла 45 м. Ниже по течению Буффало-Крик уровня выросли на 2,5 м [15].

Мачху, р. Мачху, Индия. Плотина Мачху 2 располагалась на реке Мачху в штате Гуджарат, Индия в 6 км выше по течению от города Морби. Грунтовая плотина высотой 22,5 м имела довольно сложную конструкцию. Она состояла из водосброса на участке реки и земляных насыпей с обеих сторон от водосброса, который был в состоянии пропустить расход 5663 м³/с. Ширина набережной составляла 6,1 м с уклонами 1:3 и 1:2 для откосов вверх и вниз по течению, соответственно. Ядро плотины было сложено глинами, простирающееся через аллювий до скальной породы. Верхняя сторона была облицована гравием. Дамба служила для ирригационных целей. Общая длина дамбы составляла 3742 м. Объем водохранилища составлял 110 млн. м³. Наводнение случилось 11 августа 1979 года. Причиной перелива стали обильные осадки в муссонном сезоне. Водосбросы водохранилища Мачху 1 сбросили значительный объем воды в Мачху 2. В результате в водохранилище оказалось переполнено, а водосбросы Мачху 2 не смогли справиться с таким объемом воды (Рисунок 7). Разрушение плотины произошло на обеих сторонах водосброса. Общий сброс воды через водосбросы превысил максимальный в 4 раза, расход воды составил 19 тыс. м³/с. В результате наводнения погибло 10 тыс. человек [15].



Рисунок 7 - Прорыв плотины Мачху 2, 11 августа 1979 года.

На основе собранной информации составлена сводная таблица характеристик катастрофических явлений, которые стали результатом переливов (Таблица 2). В таблицу включены характеристики водохранилищ и плотин, а также наблюдаемые максимальные расходы воды, ширины образовавшихся проранов и объемы паводков. Данные характеристики в дальнейшем будут необходимы при сравнении рассчитанных по выбранным методикам значений расходов воды и ширин прорана с наблюдаемыми значениями. Это позволит определить состоятельность использование расчетных методик при проектировании и оценке подобного рода явлений.

Таблица 3 - Сводная таблица параметров водохранилища, плотины и характеристик катастроф на водохранилищах

Водохранилище	Объем водохранилища, млн. м³	Площадь зеркала, млн. м²	Высота плотины, м	Длина по гребню, м	Ширина прорана, м	Пиковый расход воды, м³/с	Сброшенный объем воды, млн. м³
Кокпектинское	3	0,4	18	940	62	2000	7
Тирлянское	4,96	1,293	9,85	400	75	11000	8.6
Киселевское	32	200	18	1920	65	12000	32
Мачху 2	101	5,6	22	164	540	19000	101
Шади Кор	18	8,5	25	485	240	9800	18
Ка-Лока	1,5	5,7	12	25	75	770	1,1
Пруд Мидоу	0,35	0,182	36	142	40	150	0,35
Озеро Тимбер	1,8	0,303	10	150	45	990	1,8
Ситу Гинтунг	2	0,220	16	270	70	425	2
Бельцы	13	0,9	18	432	112	1200	2

Глава 3. Расчет гидравлико-морфометрических параметров прорана и максимальных расходов воды по выбранным методикам

Раздел 3.1. Обоснование используемых расчетных методов

В Главе 1 был проведен подробный анализ существующих методик расчета и моделей, позволяющих получить максимальные расходы воды прорывного паводка и морфологические характеристики прорана в случае перелива водохранилища с грунтовой плотины, а также выбраны объекты (водохранилища) в разных регионах мира, на которых наблюдались катастрофические явления, связанные с переливом через гребень грунтовой плотины. В данной главе планируется провести расчет по выбранным методическим рекомендациям («Методические рекомендации по определению расходов воды при проектировании переходов через водотоки в зоне воздействия некапитальных плотин» и РД 03-607-03).

Выбор именно этих методик, в качестве используемых в данной работе обусловлен рядом причин. Прежде всего, это оправдано практическим и инженерным характером самой работы. В ходе проектирования и строительства водохранилища с грунтовой плотиной необходимо не только производить инженерные изыскания и расчеты, на основе которых в итоге получают морфометрические характеристики водохранилища и данные, необходимые для постройки водосбросов, но и иметь возможность рассчитывать также возможные последствия для плотины и территории, которая находится ниже по течению в случае возможного перелива через гребень плотины. В связи с этим на руках у строителей и проектировщиков должны быть необходимые инструменты, которые позволят получить примерные характеристики прорана в случае перелива, а также максимальные расходы воды прорывного паводка. Вышеуказанные методические рекомендации являются такими инструментами. Кроме непосредственно расчетной части, на основе которой возможно получить необходимые характеристики, также в этих руководящих документах имеются рекомендации, которые указывают необходимые входные данные. В [7] указано, что предварительно необходимо собрать информацию о периоде постройки плотины, наличии на ней водосбросных сооружений, материале плотины, напоре, состоянии плотины на момент обследования, объеме. Кроме того, необходимо иметь информацию о случившихся в прошлом прорывах и о мерах предотвращения катастроф, которые производились. В [8], также необходимо иметь начальную входную информацию. В данном случае это максимальная разница между отметкой гребня ограждающей дамбы и

отметкой, до которой жидкие отходы могут вытекать, зависимость площади и объема хранилища от отметки заполнения, ширина гребня дамбы, заложение внутреннего и внешнего откосов дамбы, плотность частиц грунта, плотность сухого грунта, плотность и вязкость вытекающих жидких отходов, средневзвешенный размер частиц грунта [8]. Все эти данные необходимы для использования расчетных схем.

Расчеты расхода воды в данных методических рекомендациях представляют уравнения, которые основаны на теоретических положения гидравлики. В основу уравнений заложено уравнение для расчета расхода водослива с широким порогом

$$Q = m * b * \sqrt{2 * g * H^{\frac{3}{2}}} \quad (41)$$

Где m – коэффициент расхода воды, b – ширина порога водослива, H – напор [12]. Они отличаются простотой и не учитывают неустановившийся характер потока. На основе этих формул можно получить максимальные расходы воды. Также в РД есть возможность получить и другие характеристики потока, в частности скорость и глубину потока на основе эмпирических формул (8), (9), (10).

Характеристики прорана также определяются на основе расчетов. Способ представленный [7] основан на табличных значениях коэффициента, учитывающего отношение возможной ширины прорыва к длине плотины, который является эмпирическим. На основе него получается ширина прорана, которая, по сути, является единственной характеристикой прорана, которую можно определить. Схема получения характеристик прорана в РД [8] сложнее и подробно описана в главе 1. В основу этой схемы входят теоретические положения грунтоведения и динамики наносов [5].

Следующей причиной выбора именно этих методических указаний является возможность проследить то, каким образом рассчитанные значения по данным методикам отличаются от наблюдаемых ширин проранов и максимальных расходов воды. Логическим итогом использования данных руководящих документов является полученные расчетных характеристик, таких как ширина прорана, его глубина, максимальный расход прорывного паводка. С одной стороны, это необходимо при проектировании водохранилищ в целом, так как полученные характеристики позволят определить возможные масштабы катастрофы в случае возможного перелива. С другой стороны, в дальнейшем полученные данные можно использовать для расчетов площадей затопления

территории в случае перелива, а также оценивать материальный ущерб, который может быть нанесен населенным пунктам, инфраструктуре и т.д.

Третья и главная причина связано непосредственно с самими методиками. Подробный их анализ, описанный в главе 1, позволил выявить ряд недостатков методических указаний, связанных преимущественно с теоретическими положениями, заложенными в расчетные схемы. Однако проверка того, каким образом эти недостатки влияют на рассчитанные значения и их отличие от наблюдаемых, требует практического использования тех формул, которые в них описаны. Это позволит оценить влияние теоретических недостатков этих методик, что в дальнейшем, при углубленном исследовании процесса и разработке кардинально новых и более точных методов расчета поможет учесть эти недостатки.

Кроме данных расчетных методик было принято решение использовать модель Ю. Б. Виноградова, которая описывает прорыв озера подпруженного ледяной плотинной. Данное решение было связано со схожестью процессов. Процесса опорожнения такого озера определяется увеличением площади поперечного сечения туннеля по мере сработки объема озерной воды, что в целом схоже с процессом перелива через грунтовую плотину, когда происходит увеличение прорана за счет сработки воды из водохранилища, а также падением гидростатического напора. [1]

Изменение поперечного сечения туннеля записывается следующим образом

$$-\frac{d\omega}{dW} = \frac{\rho_0}{\rho l} \left[C_0 * (t_1 - t_2) + g * (H + h) - \frac{v^2}{2} \right]_{(42)}$$

Где ω – площадь поперечного сечения туннеля, H – уровень воды в озере относительно центра тяжести входного отверстия туннеля, h – превышение точки входа в туннель над точкой выхода из него, l – длина туннеля, v – скорость потока на выходе из туннеля, C_0 – удельная теплота плавления льда, Дж/кг. Глубина озера у входа в туннель связана с объемом воды следующим соотношением

$$H = aW^m$$

Где a , m – морфометрические параметры озерной чаши. При этом третья слагаемое в квадратных скобках очень мало в сравнении с остальными. Учитывая эти два условия, уравнение переписывается следующим образом

$$-\frac{d\omega}{dW} = \frac{\rho_0 g}{\rho r l} [C_0 * (t_1 - t_2) + h + aW^m] \quad (43)$$

Дифференцируя это уравнение, получаем

$$\omega = \frac{\rho_0 g}{\rho r l} \left\{ [C_0 * (t_1 - t_2) + h](W_0 - W) + \frac{a}{m+1} (W_0^{m+1} - W^{m+1}) \right\} + \omega_0 \quad (44)$$

Где W_0 – объем озера к моменту прорыва, ω_0 – начальная площадь поперечного сечения туннеля, которую равна 0.

На основе полученного уравнения для поперечного сечения туннеля рассчитывается расход воды прорывного паводка. Процесс спуска воды из озера производится как истечение через короткую трубу. Причиной этому является предположение о том, что туннель саморегулируется на пропуск тех расходов, которые эта труба будет подавать. Формула для расчета расхода воды через туннель в общем виде выглядит следующим образом

$$Q = \alpha * \omega^{\frac{3}{4}} * \sqrt{H} \quad (45)$$

Где α – эмпирический коэффициент, подбирающийся исходя из наилучшего соответствия модели и действительности. Подставляя в формулу площадь поперечного сечения получаем

$$Q = \alpha * \left[\frac{\rho_0 g}{\rho r l} \left\{ [C_0 * (t_1 - t_2) + h](W_0 - W) + \frac{a}{m+1} (W_0^{m+1} - W^{m+1}) \right\} + \omega_0 \right]^{\frac{3}{4}} * \sqrt{aW^m} \quad (46)$$

Как уже было сказано ранее, выбор именно этой модели для расчета связан со схожестью процессов прорыва ледника и перелива через грунтовую плотину. Схожесть этих двух процессов определяется характером развития поперечного сечения. Процесс увеличения площади поперечного с физической точки зрения определяется как динамическими характеристиками самого потока, так и его тепловыми характеристиками. Первые выражаются через напор и скорость потока на выходе из туннеля, а вторые через температуру потока, как внешнюю силу воздействия на ледовую плотину и через удельная теплота плавления льда, показывающая количество теплоты, которое необходимо сообщить одной единице массы льда чтобы перевести его из твёрдого состояния в жидкое и являющаяся, по сути, характеристикой сопротивления. В случае с процессом развития прорана, основную роль в качестве сил внешнего воздействия там играют только динамические характеристики потока, а силами сопротивления являются силы связанности

грунтов, степени их уплотнения и т.д. Кроме того, процесс развития имеет еще более выраженную схожесть с процессом прорыва озера, подпруженного мореной. Процесс прорыва моренной плотины связан с одной стороны с характеристиками морен, которые в данном случае определяются наличием льда в морене, а также степенью связанности грунта. Однако достаточно удовлетворительной модели для описания процесса прорыва морены найти не удалось.

Таким образом были выбраны основные методики расчета, которые будут использоваться в данной работе. Выбор их определялся с одной стороны необходимостью оценить работоспособность для целей проектирования и проверить на сколько рассчитанные по этим методикам значения соответствуют наблюдаемым, которые были определены для случаев перелива, указанных в главе 2. С другой стороны, причиной стали определенные в главе 1 недостатки, связанные с заложенными в методических рекомендациях теоретическими принципами. Расчет по методикам для конкретных объектов позволит определить характер влияния этих недостатков на рассчитанные значения. Кроме того, было принято решение использовать модель Ю.Б. Виноградова для прорыва озера подпруженного ледником из-за схожести процессов развития поперечного сечения туннеля и развития прорана. По данной модели планируется рассчитывать значения расходов воды и сравнивать максимальные полученные значения с пиковыми наблюдаемыми. Это позволит определить, можно ли использовать общие математические и физические принципы, заложенные в эту модель, при построении расчетной методики или модели развития прорана при переливе грунтовой плотины.

Раздел 3.2. Расчет характеристик прорана и максимальных расходов воды

От обоснования использования методик перейдем к описанию полученных результатов. В главе (обзор объектов) были выбраны водохранилища, на которых происходили катастрофические прорывы, связанные с переливом через грунтовую плотину (Таблица 2). Также, в процессе поиска информации об этих катастрофах были собраны сведения о параметрах водохранилищ и наблюдаемых значениях ширин проранов, образовавшихся в ходе перелива, максимальных наблюдаемых расходах воды и объемах сброшенной воды (Таблица 3).

Первой используемой расчетной схемой являлась схема, указанная в «Методических рекомендациях по определению расходов воды при проектировании переходов через водотоки в зоне воздействия некапитальных плотин». Для расчетов по данной методике нужно иметь информацию о ширине плотины, а также разнице отметок верхнего и нижнего бьефа.

Необходимая для расчетов информация была собрана и приведена в Таблице 2. Затем эти характеристики использовались в формуле (1) для расчета максимального расхода воды, которая приведена в главе 1. Кроме того, важным условием для этой формулы является $K_{пр}$ – коэффициент, учитывающий отношении длины плотины к возможной ширине прорыв, который находится из таблицы, приведенной в методическом указании. Расчет максимальных расходов воды представлен в Таблице 4.

Таблица 4 - Расчет по ПМП

	Напор (Н), м	Длина (В), м	$K_{пр}$	Q	Ширина прорана, м
Кокпектинское	18	940	0.25	17946	235
Тирлянское	9.85	400	0.28	3462	112
Киселевское	18	1920	0.25	36656	480
Мачху 2	22	3742	0.25	96533	936
Шади Кор	25	150	0.38	7125	57
Ка-Лока	12	25	0.48	499	12
Пруд Мидоу	36	142	0.38	11655	54
Озеро Тимбер	10	150	0.38	1802	57
Ситу Гинтунг	16	270	0.33	5702	89
Бельцы	18	432	0.27	8908	117

Следующей использованной расчетной схемой являлась схема, приведенная в РД 03-607-03. Как неоднократно отмечалось ранее, данная расчетная схема значительно шире и сложнее, чем в «Методических рекомендациях...». Прежде всего задавались необходимые начальные условия, а именно максимальная разница между отметкой гребня ограждающей дамбы и отметкой, до которой жидкие отходы могут вытекать, зависимость площади и объема хранилища от отметки заполнения, площадь зеркала водохранилища, ширина гребня дамбы, заложение внутреннего и внешнего откосов дамбы, плотность частиц грунта, плотность сухого грунта, плотность и вязкость вытекающих жидких отходов, средневзвешенный размер частиц грунта. В связи с тем, что некоторую информацию найти оказалось затруднительно, был принят ряд допущения о начальных условиях:

- Глубина прорана, который образовывался в ходе перелива в каждом из случаев, принято считать до основания, то есть равным высоте плотины;
- Заложение внутреннего и внешнего откосов дамбы для каждого водохранилища задавалось одинаковым;

- Средневзвешенный размер частиц грунта задавался для суглинков и был равен 0,05 мм.

Первое допущение позволяет оценивать максимальную разницу между отметкой гребня ограждающей дамбы и отметкой, до которой жидкие отходы могут вытекать равной высоте плотины. Третье допущение исходит из предположения, что в качестве ядра плотины выступают связные грунты – суглинки.

Допущение о средневзвешенном размере частицы позволяет посчитать неразмывающую скорость по формуле (11), принимая эквивалентный диаметр d_3 равным 4 мм (для суглинков). Также была рассчитана гидравлическая крупность для случая, когда диаметр частиц $d \leq 0,1$. Расчет производился по формуле (13).

Далее следовали итеративные расчеты. На основе заданного приращения Δu и рассчитанных по формуле (4) приращения ширины Δb рассчитываются значения ширины прорана и его глубины на каждом i – том шаге итерации. Затем для каждого шага рассчитывался объем выносимого потоком материала ΔW_i по формуле (19). Рассчитанные значения неразмывающей скорости и гидравлической крупности использовались для определения транспортирующей способности потока μ_i по формуле (14). Полученные значение μ_i и объема выносимого материала ΔW_i для каждого i – того шага использовались для определения приращения объема воды, который вытекает из водохранилища ΔV_i по формуле (18). Далее рассчитывается слой вытекающей воды H_i , на основе которого рассчитываются расход воды Q_i , глубина потока в проране h_i и скорость потока в проране u_i . Приращения объема ΔV_i для каждого шага итерации последовательно складывались. Расчет велся до тех пор, пока результат последовательного сложения ΔV_i не становился равным объему катастрофического паводка для каждого конкретного случая.

Таблица 5 - Расчетные характеристики, полученные по РД 03-607-03

	Ширина прорана, м	Расход воды, м ³ /сек
Кокпектинское	39	2257
Тирлянское	63	13790
Киселевское	92	51140
Мачху 2	154	148646

	Ширина прорана, м	Расход воды, м ³ /сек
Шади Кор	330	23466
Ка-Лока	43	3514
Пруд Мидоу	37	79
Озеро Тимбер	24	1295
Ситу Гинтунг	21	956
Бельцы	134	2519

Информация об объемах паводков приведена в Таблице 3. Результатом всех этих действий являются рассчитанные значения максимальных расходов воды и ширины прорана при полном опорожнении водохранилища, которые представлены в Таблице 5.

Как уже было сказано ранее, было принято решение использовать в качестве альтернативного расчета модель прорыва озера, подпруженного ледником, Ю.Б. Виноградова. Данная модель была заложена в основу программы, составленной С.В. Поповым. Данная модель позволяет получить время, за которое объем воды в озере будет спущен, и гидрограф стока. Также, с использованием гидрографа можно получить максимальный расход воды прорывного паводка. В качестве задаваемых параметров в программе есть максимальный объем резервуара, температура озера, длина тоннеля, напор, толщина ледяной плотины, плотность льда, теплота плавления льда, плотность стены. Кроме того, также есть необходимые для модели эмпирические коэффициенты, а именно α - эмпирический коэффициент, подбирающийся исходя из наилучшего соответствия модели и действительности, а также a , m – морфометрические параметры озерной чаши, которые необходимы для расчета связи глубины от объема озера. Последние могут задаваться двумя способами: первый - на основе созданной в программном обеспечении Surfer, которая позволяет строить трехмерные модели рельефа, а в данном случае, трехмерные модели озерной чаши по данным батиметрической съемки, с помощью которой можно определить необходимые морфометрические параметры, а второй – на основе имеющихся данных о глубине и соответствующему ей объему воды в озере, на основе которых и можно построить вида степенную зависимость.

$$H = aW^m \quad (47)$$

Параметры напора, толщины плотины, ее плотности и максимального объема задавались согласно имеющимся данным о водохранилищах. В данном случае было принято решение о том, что напор при переливе соответствует высоте грунтовой плотины, а плотность материала плотины задавалась для случая заданного грунта, что позволяло в некоторой степени приблизить модельный расчет к случаю прорыва грунтовой плотины. Довольно важным при подготовке необходимой входной информации для модели было нахождение морфометрическим параметров чаши водохранилища. В связи с тем, что необходимых данных, а именно графиков связи глубины от объема не было, было принято решение строить связи, основываясь на расчетах по РД 03-607-03. Для этого полученные данные выводились в среду MATLAB, где заранее был написан код для аппроксимации связи $H=f(W)$ степенной функцией и вывода необходимых коэффициентов. Затем полученные коэффициенты вносились в модель, после чего производился расчет.

Для сравнения рассчитанных значений по модели со значениями, полученными по «Методическим рекомендациям...» и РД 03-607-03, а также с наблюдаемыми, брались преимущественно максимальные расходы воды для каждого из случаев.

После непосредственного расчета по обоим методикам и по модели были составлены сводные таблицы максимальных расходов воды и ширин прорана (Таблица 5,6).

Таблица 6 - Сводная таблица рассчитанных и наблюдаемых максимальных расходов воды, м³/с.

	ПМП	РД	Виноградов Ю.Б.	Наблюденные
Кокпектинское	17946	2257	2232	2000
Тирлянское	3462	13790	12972	11000
Киселевское	36656	51140	15785	12000
Мачху 2	96533	148646	18974	19000
Шади Кор	23038	23466	11609	8000
Ка-Лока	499	3514	591	770
Пруд Мидоу	11655	79	194	250
Озеро Тимбер	1802	1295	815	990
Ситу Гинтунг	5702	956	701	425
Бельцы	8908	2519	1010	1200

Таблица 7 - Сводная таблица рассчитанных и наблюдаемых ширин прорана, м.

	ПМП	РД	Наблюденные
Кокпектинское	235	39	62
Тирлянское	112	63	75
Киселевское	480	92	65
Мачху 2	1385	154	540
Шади Кор	184	330	240
Ка-Лока	12	43	75
Пруд Мидоу	54	37	40
Озеро Тимбер	57	24	45
Ситу Гинтунг	89	21	70
Бельцы	117	134	112

Исходя из анализа данных в Таблицах 5 были получены следующие выводы:

- Наиболее близкие к наблюдаемым значения были получены по РД 03-607-03 и по модели Ю.Б Виноградова;
- В качестве исключения, значительные отличия расчетных значений от наблюдаемых были для Киселевского водохранилища, Мачху-2 и Шади Кор, Ка Лока;
- Максимальные расходы воды, рассчитанные по «Методическим рекомендациям...» практически во всех случаях не совпадают с наблюдаемыми значениями. Исключение составляет водохранилище Ка-Лока.

Получившаяся ситуация может объясняться рядом причин. Если говорить о близости рассчитанных по модели Ю.Б. Виноградова значений максимальных расходов воды и наблюдаемых, то в данном случае это может быть связано с тем, каким образом математически описывается тот процесс, который заложен в ней. Изменение поперечного сечения в туннеле, от которого во многом и зависит то, каким получается расход, описывается уравнением, которое строится на общем для всех физических процессов принципе. В данном случае есть силы потока (динамические и тепловые характеристики), выступающие в качестве внешней силы воздействия на ледяную плотину, и характеристики

ледяной плотины (его плотность, толщина и коэффициент плавления льда), выступающие в качестве сил сопротивления, препятствующих разрушению ледяной плотины. В общем виде процесс, заложенный в уравнении можно описать, опираясь на третий закон Ньютона:

$$F_{\text{потока}} = -F_{\text{ледяной плотины}} \quad (48)$$

В связи с тем, что использование модели несет чисто экспериментальный характер, плотность материала плотины в данном случае задавалась не для льда, а для грунта (суглинка). Это позволяло в определенной степени приравнять условия формирования и изменения поперечного сечения к условиям грунтовой плотины. Таким образом, рассчитанные значения с одной стороны получились из физически обоснованного уравнения, в котором учитывались как силы потока, так и силы сопротивления, а с другой стороны, задаваемые в модели начальные параметры были приближены к условиям формирования прорана в грунтовых плотинах.

В случае со значениями, которые были рассчитаны по РД 03-607-03, то здесь подобная близость также связана с особенностями расчетной схемы. Однако в данной ситуации силами сопротивления уже являются характеристики грунта. При этом то, каким образом частицы суглинка взаимодействуют с потоком описывается неразмывающей скоростью потока для связного в которой присутствует член удельного сцепления грунта, определяющее связанность. Неразмывающая скорость впоследствии используется для расчета транспортирующей способности потока – характеристики, которая определяет максимально возможный перенос вещества при данных динамических характеристиках потока. Через эту величину при помощи формулы (18) затем рассчитывалась изменения объема водохранилища ΔV_i , а через изменение объема уже получались значения изменения уровня воды в водохранилище ΔH_i и затем H_i для каждого i -го шага итерации. Однако, как было сказано в общих выводах, не все полученные значения максимальных расходов воды получались довольно близкими к реальным. Во многом, это может объяснять тем, каким образом велся расчет для изменения самого прорана. Ранее в главе (литобзор методик) было указано, что указанной расчетной схеме расчет основных изменения объема и уровня в водохранилище и расчет изменения характеристик прорана (длины, ширины, глубины) ведутся обособленно, т.е. если не вести расчеты изменения объема, скорости, расхода воды или уровня, то в целом это никак не повлияет на изменение прорана. С другой стороны, количество выносимого материала из прорана, определяющееся характеристикой ΔW_i , играет важную роль, так как с

ее использованием по соотношению (18) рассчитывается ΔV_i . Изменение объема определяет изменение уровня ΔH_i и, следовательно, уровень воды H_i для каждого i -го шага итерации. Т.е. изменение прорана косвенно влияет на уровень воды, на основе которого по формуле (9) рассчитывается расход воды, что свидетельствует о влиянии изменения прорана на изменение максимального расхода воды. Но, так как, физически изменение прорана никак не обосновано (приращение глубины Δu задается самостоятельно и на его основе просчитывается приращение ширины Δb), то можно утверждать, что увеличение расхода воды будет практически постоянным вплоть до конца расчета, пока значение объема не достигнет некоторого максимального значения, которое может соответствовать объему самого водохранилища. В случае значительных объемов водохранилища (Мачху-2 – 101 млн. м³, Кисилевское – 32 млн. м³) это, в общем-то и проявляется: доведя расчет до максимального объема водохранилища, мы, в итоге, получили запредельные значения расходов воды, которые не соответствовали реально наблюдаемым значениям.

Что касается расчетных значений по «Методическим рекомендациям...», то здесь подобное несоответствие вызвано тем, что учет характеристик прорана ведется на эмпирическом уровне, за счет коэффициента, учитывающего отношение возможной ширины прорыва к длине плотины. Безусловно, на простейшем уровне это позволяет получить оценочный максимальный расход прорывного паводка, однако физически он никак не обоснован. Кроме значений расходов воды это можно проследить и для значений ширин прорана, полученных с использованием этого коэффициента: в 6 из 10 случаях эти значения никак не соответствуют реальным. При этом значения ширин, полученные по РД 03-607-03 оказались гораздо ближе к наблюдаемым, за исключением лишь одного случая (Мачху-2). Однако в этом случае это скорее можно объяснить особенностью самой плотины, которая имела довольно сложную конструкцию.

Исходя из вышесказанного, можно сделать общий вывод, что наиболее приближенные к реальным значениям результаты получаются с использованием модели Ю.Б. Виноградова и по РД 03-607-03. Однако следует внести несколько оговорок. Во-первых, так как использование модели носило чисто экспериментальный характер, а начальные условия вносились для наибольшего приближения к случаю прорыва грунтовой плотины, что безусловно не соответствует лишь в некоторой степени соответствующему заложенному в нее процессу, то широкое применение модели для расчетов не может быть полностью оправдано. Однако стоит отметить, что математические

принципы и логику, на основе которых строится модель, а также достаточная физическая обоснованность вполне могут быть использованы для построения, непосредственно, модели прорыва грунтовой плотины. Во-вторых, касаясь расчетной схемы в РД 03-607-03, следует принимать во внимание факт обособленности расчета изменения прорана и изменения объема и, соответственно, других характеристик (расход, уровень воды в водохранилище). Кроме того, при возможной разработке альтернативно методики или же модели прорыва грунтовой плотины, многие физические принципы из этой методики могут быть использованы. Что же касается расчета по «Методическим рекомендациям...», то в данном случае ее использование уместно в том случае, когда необходимо оперативно получить необходимую информацию о максимальных расходах воды и ширине возможного прорана.

Раздел 3.3 Альтернативные теоретические подходы расчета образования прорана

В Главе 1 были приведены общие выводы о процессе формирования и развития прорана. Теперь воспользуемся данными выводами, для того чтобы пошагово сформулировать физическую концепцию процесса. В начальный момент времени, когда происходит перелив воды через грунтовую, происходит постепенное увеличение скорости потока. По достижении скорости потока критического значения (неразмывающей скорости) начинается смыв частиц. С другой стороны силы сопротивления грунта, которые зависят от сцепления и угла внутреннего трения, препятствуют смыву частиц. Обобщая вышесказанное, можно утверждать, что объемы вымываемого грунта зависит с одной стороны от скорости потока, а с другой от сопротивления грунта сдвигу.

Если вводить предположение о том, что сечение прорана в процессе сброса воды сохраняет условно треугольную форму в начале процесса размыва, а сам прорана по всей ширине плотины представляет собой некую призматическую фигуру, то зная объем вынесенного грунта, можно вычислить характеристики прорана. Объем такой призматической фигуры определяется по следующей формуле.

$$W = 0,5 * l * b * h \quad (49)$$

Где l , b , h – длина, ширина и глубина прорана, соответственно. Используя простейшие геометрические формулы, можно выразить ширину и длину прорана через глубину

$$b = h^{3/2} * \cot \gamma * 2\sqrt{h} \quad (50)$$

$$l = l_{гр} + (m_{отк} + n_{отк}) * h \quad (51)$$

Где γ – угол естественного откоса (внутреннего трения) грунта, $m_{отк}$ и $n_{отк}$ – углы внешнего и внутреннего откосов дамбы, $l_{гр}$ – ширина дамбы по гребню плотины. Подставляя соотношения для ширины и длины, получаем следующую формулу объема вынесенного из прорана грунта

$$W = 0,5 * [l_{гр} + (m_{отк} + n_{отк}) * h] * [h^{\frac{3}{2}} * \cot \gamma * 2\sqrt{h}] * h \quad (52)$$

В случае, когда нам известен объем вынесенного материала, данное уравнение становится уравнением с одним неизвестным, так как параметры γ , $l_{гр}$, $m_{отк}$ и $n_{отк}$ в ходе обследования интересующей дамбы (полевого или же на основе технических характеристик) можно получить.

Однако данный пример расчета характеристик прорана через объем вынесенного материала может быть использован лишь на начальном этапе. Большое количество видео- и фотоматериалов показывают, что полностью сформированный прорана имеет форму условной трапеции. За счет этого формула может значительно усложниться. Объем трапецеидальной призмы рассчитывается таким образом

$$W = 0.5 * (b_{дна} + b_{прорана}) * h * l \quad (53)$$

Также не совсем ясно, в какой момент времени происходит переход от треугольного сечения в трапецеидальное.

Объемная характеристика, необходимая для расчета параметров прорана может быть получена через транспортирующую способность потока S – величину, которая показывает количество взвешенных и влекомых наносов при данных гидравлико-морфометрических характеристиках потока и измеряющаяся в $кг/м^3$. В данном случае переход к объему вынесенного материала можно производится следующим путем

$$W = \frac{S * Qt}{\rho_{грунта}} \quad (54)$$

Где Q – расход воды в $м^3/с$, t – время, за которое происходит размыв в сек, $\rho_{грунта}$ – плотность грунта, $кг/м^3$.

Вопрос расчета транспортирующей способности потока относится к разделу динамики наносов. В разное время этим вопросом занимались Глушков В.В., Макавеев В.М., Великанов М.А., Караушев А.В. и многие другие

известные гидрологи [5]. Как было указано в главе (литообзор) расчет средней мутности потока в общем виде представляется в следующем виде

$$S_{\text{ср}} = k * \frac{u^m}{H^n * X^a} \quad (55)$$

Таким образом, мутность зависит от скорости потока v , гидравлической крупности частиц грунта X и глубины потока H .

$$W = f(v, \tau) \quad (56)$$

Выражая объем выносимого грунта через транспортирующую способность получаем

$$W = k * \frac{u^m}{H^n * X^a} * \frac{Qt}{\rho_{\text{грунта}}} \quad (57)$$

В данном простейшем случае описания расчета объема вынесенного грунта не достаёт лишь учета сопротивления грунта сдвигу, как силы противодействующей смыву, а также учета неразмывающей скорости. Для решения недоучета неразмывающей скорости воспользуемся примером, основанным на формуле предельной мутности [3].

$$W = k * \frac{(v - v_{\text{разм}})^m}{H^n * X^a} * \frac{Qt}{\rho_{\text{грунта}}} \quad (58)$$

Как видно из данного соотношения видно, что учета сопротивления сдвига здесь нет. Однако можно предположить, что в данном конкретном случае сопротивление сдвига будет обратно пропорционально объему выносимого грунта, т.к. данная характеристика препятствует размывающему воздействию потока, а, следовательно, уменьшает количество выносимого материала. Кроме того, следует отметить, что в данном случае, данное соотношение зависит от эмпирических степенных коэффициентов, что достаточно упрощает расчет с одной стороны, но и изрядно уменьшает возможность использования данного метода

Понимание процесса развития прорана, описанное выше в некоторой степени схоже с тем, что математически описано в расчетной схеме, предложенной в РД 03-607-03. Единственным отличием является то, что в указанном главе примере возможного расчета, кроме характеристик потока имеет смысл учитывать и сопротивление сдвигу. С другой стороны, исходя из формулы для расчета неразмывающей скорости есть учет удельного сцепления грунта.

Альтернативным вариантом может служить возможность математического описания размыва грунта тела плотины и формирования прорана через интенсивность смыва. Согласно [11], интенсивность смыва $I_{см}$ – отношение средней толщины размывтого слоя грунта ко времени, за которое размыв происходил. Описывается данная характеристика следующим уравнением

$$I_{см} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (59)$$

Также указано, что средняя толщина размывтого слоя грунта зависит от скорости размыва (неразмывающей скорости грунта) и сопротивления грунта сдвигу. Следовательно, можно функционально описать интенсивность смыва как функцию от неразмывающей скорости потока и от сопротивления сдвига

$$I_{см} = \frac{\Delta h}{\Delta t} = f(v, \tau) \quad (60)$$

Толщина размывтого слоя технически может приравниваться к глубине прорана, т.к. в конечном итоге чем больше смывается грунта, тем больше становится глубина прорана. Таким образом глубина прорана функционально зависима от неразмывающей скорости потока и сопротивления сдвигу. Кроме того, получив глубину прорана для каждого момента времени, можно получить также ширину прорана и его длину по выше указанным формулам

$$b = h^{3/2} * \cot \gamma * 2\sqrt{h} \quad (61)$$

$$l = l_{гр} + (m_{отк} + n_{отк}) * h \quad (62)$$

Следует также отметить, что, как и в случае с объемом, зависимость от скорости будет напрямую, а от сопротивления сдвига обратная. Тем не менее, данный вариант математического описания недостаточно отработан и требует дальнейшей доработки.

Таким образом в данном разделе описан один из возможных способов объяснения процесса формирования и развития прорана. На основе анализа некоторых примеров прорывов грунтовых плотин в результате перелива, а также на основе фундаментальных трудов по грунтоведению и динамике наносов выделены основные этапы формирования прорана и силы, воздействующие на процесс. Кроме вышесказанного, приведены два возможных способа математического описания развития прорана в наиболее простейшей интерпретации. Усложнение и дальнейшие развитие этих

математических способов невозможно без дальнейшего анализа, поэтому в этой работе было принято решение остановиться на этих наиболее емких способах.

Заключение

В заключении стоит отметить, что основную цель данной работы можно считать достигнутой. В ходе исследовательской работы были проанализированы существующие способы и методы расчета характеристик прорана и максимальных расходов воды. Условно их можно определить в 4 группы: руководящие документы, концептуальные расчетные методы, детерминированные модели на основе систем дифференциальных уравнений с включением блока эрозионного размыва и стохастические методы оценки устойчивости грунтовой плотины. В ходе этого анализа были выявлены недостатки этих методов. Особый акцент делался на руководящих документах, так как они используются при проектировании гидротехнических сооружений. Основными их недостатками можно считать недоучет формирования прорана как в случае с ПМП, где данный процесс выражается коэффициентом, учитывающим отношение ширины прорана к длине плотины. Для РД 03-607-03 характерно использование эмпирических соотношений, которые имеют довольно узкий диапазон использования, а также недоучет связи между формированием прорана и сбросом воды, выражающейся в том, увеличение сброса воды влияет на изменение характеристик прорана, а увеличение характеристик прорана, в свою очередь, влияет на увеличение сброса воды, что при непосредственном использовании выражается в обособленности расчете изменения морфометрических характеристик прорана. Также была собрана информация о некоторых случаях прорыва водохранилищ в результате перелива через грунтовую плотину и рассчитаны необходимые характеристики по выбранным методикам. Собранные и рассчитанные данные позволили в дальнейшем проводить расчет по выбранным методикам и проводить сравнение рассчитанных и наблюдаемых значений.

Для расчета были выбраны следующие методики: ПМП, РД 03-607-03 и модель прорыва озера подпруженного ледником Ю.Б. Виноградова. Использование методик позволило получить расчетные значения, которые сравнивались с наблюдаемыми значениями. Произведено обсуждение результатов на основе которых для рассчитанных значений выявлены основные нюансы, связанные с особенностями использованных методов. Недостатки, которые были выявлены в ходе анализа, во многом, повлияли на расхождение рассчитанных и наблюдаемых значений. В большей степени это характерно для ПМП. В частности, использование условного эмпирического коэффициента для

получения возможной ширины прорана являлось довольно неточным, что сказывалось на расхождении в наблюдаемых и рассчитанных значениях, а также в полученных значениях расходов воды. Наиболее удовлетворительные результаты были получены по модели Ю.Б. Виноградова, что связано с особенностями заложенных в модели уравнений, которые описывают физику процесса, и с тем, что начальные параметры для расчета по модели задавались максимально приближенными к случаю грунтовой плотин. Также в большинстве выбранных случаев довольно близкие значения давала методика РД 03-607-03. Расчетная схема включала в себя расчет характеристик прорана, характеристик грунта и потока, что во многом и определило близость значений. Тем не менее, для некоторых случаев значения имели расхождения. Это связано с обособленностью расчета характеристик прорана и изменений объемов и расходов воды, т.е. изменение гидравлично-морфометрических характеристик прорана никак не зависит от истечения воды из водохранилища и от рассчитываемых характеристик грунта. В данном случае это не совсем верно, так как связь между изменением характеристик прорана и изменением объема воды в водохранилище работает в обе стороны, что было подробно указано выше. Кроме того, были предложены альтернативные подходы возможного математического описания процесса образования прорана на основе выявленных этапов процесса и основных факторов. В первом приближении преимущество этих вариантов является возможный учет связи между процессом размыва прорана и сбросом воды, а также учет сил внешнего воздействия, а именно динамических характеристик потока, и сил сопротивления грунта, зависящих от сцепления грунта и угла внутреннего трения.

Формирование и последующее развитие прорана – один из ключевых факторов, влияющих на опорожнение водохранилища при переливе. Ключ к пониманию этого процесса – понимание того, каким образом истечение воды влияет на вынос материала из прорана. В дальнейшем это позволит создать наиболее приближенную модель формирования прорана, что поможет в прогнозировании подобных явлений как в процессе проектирования грунтовой плотины, так и во время эксплуатации уже имеющихся водохранилищ.

Список используемой литературы

1. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений
2. Волосухин В.А., Волосухин Я.В. Нормативное, правовое и техническое регулирование в области безопасности гидротехнических сооружений. – М.: Гидросооружения, №1, 2010, с. 22-30.
3. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л., Гидрометеиздат, 1969, 424 с.
4. Гидротехнические сооружения /Г.В. Железняков, Ю.А. Ибад-заде, П.Л. Иванов и др.; под общ. Ред. В.П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983.
5. Караушев А.В. Теория и методы расчета расхода речных наносов. – Л.: Гидрометеиздат, 1977, 272 с.
6. Кременецкий, Н. Н. Гидравлика: учебник для с.-х. техникумов по специальности "Гидромелиорация". - 3-е изд. – М.: Энергия, 1975. - 416 с.
7. Методические рекомендации по определению расходов воды при проектировании переходов через водотоки в зоне воздействия некапитальных плотин. - М., 1981.
8. РД 03-607-03 Методические рекомендации по расчету развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов.
9. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М., «Колос», 1967, 179 с.
10. Пономарчук К.Р. Оценка параметров развития прорана при разрушении грунтовой плотины. – М.: Природообустройство, №3, 2011, с. 77 – 82.
11. Трофимов В.Т., Королёв В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. Грунтоведение. Под ред. В.Т.Трофимова – 6-е изд., перераб. и дополн. – М.: Изд-во МГУ, 2005, 1024 с.
12. Чертоусов, М.Д. Гидравлика. Спец. Курс, Для гидротехн. специальностей высш. учеб. Заведений. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. - 640 с.
13. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: Энергоиздат, 1984.
14. Mouyeaux A., Carvajal C., Bressolette P., Peyras L., Breul P., Vacconnet C. Probabilistic stability analysis of an earth dam by Stochastic Finite Element Method based on field data. Computers and Geotechnics, 101, 2018, p. 34–47.

- 15.RCEM – Reclamation Consequence Estimating Methodology. Dam Failure and Flood Event Case History Compilation. - U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2014.
- 16.Sharma K.P, Kumar A. Case Histories of Earthen Dam Failures. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. - Missouri University of Science and Technology, 2013.
17. Tingsanchali T., Chinnarasri C. Numerical modelling of dam failure due to flow overtopping. - Hydrological Sciences Journal, 46 (1), 2001, p. 113-130.
- 18.Zagonjoli. M. Dam break modelling, risk assessment and uncertainty analysis for flood mitigation. - Taylor and Francis/Balkema, 2007.