

**РАСЧЕТ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПРОРАНА И
МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ПРИ
ПРОРЫВАХ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН**

**CALCULATION OF THE
MORPHOMETRIC
CHARACTERISTICS OF THE
CLOSURE CHANNEL AND THE
EXTREME DISCHARGE DURING
BREAKTHROUGHS OF GROUND
DAMS**

Т.А. Виноградова¹, М.А. Макушин¹,
И.А. Виноградов², Е.А. Парфенов²,
М.М. Кадацкая², С.И. Сазонова²

Tatiana A. Vinogradova¹, Miron A. Makushin¹,
Ivan A. Vinogradov², Evgeni A. Parfenov²,
Mariya M. Kadatskaya², Svetlana I. Sazonova²

¹Санкт-Петербургский государственный
университет, г. Санкт-Петербург, Россия

¹St. Petersburg State University, St. Peters-
burg, Russia; ²Scientific and Industrial Re-

²ООО НПО «Гидротехпроект», г. Санкт-Пе-
тербург, г. Валдай, Россия

search Association *Gidrotehproekt*, St. Pe-
tersburg, Valday, Russia

mk@npogtp.ru

mk@npogtp.ru

Аннотация. Работа посвящена вопросу рас-
чета размеров прорана в грунтовых плотинах
при переливе воды из водохранилища через
гребень и максимального расхода волны про-
рыва.

Abstract. The work is devoted to the calcu-
lation of the size of the closure channel in the
ground dams when water is poured from the
water reservoir through peak and the extreme
discharge of the dam break wave.

Были проанализированы методы расчета, про-
писанные в нормативных документах и реко-
мендованные контролирующими органами.
Выполнен расчет морфометрических характе-
ристик прорана и максимальных расходов
прорывной волны различными методами для
конкретных объектов, сравнение с эксперт-
ными оценками этих параметров. Отмечено,

The authors analyzed the methods of calcu-
lation prescribed in regulations and recom-
mended by regulatory authorities. The calcu-
lation was made of the morphometric charac-
teristics of the closure channel and extreme
discharge of the dam break wave by various
methods for specific objects, the comparison
with expert estimates of these parameters. It
is noted that the method, described in two

что изложенная в двух нормативных документах методика, не имеет под собой физического обоснования, поскольку полученные размеры прорана и параметры волны прорыва не зависят от первоначального объема воды в водохранилище. В свою очередь расчетная схема другого нормативного документа не учитывает такой фактор, как время размыва и результат расчета отличается в разы при разном заданном шаге глубины размыва. Для данного документа характерно использование эмпирических соотношений, которые имеют довольно узкий диапазон использования, а также недоучет связи между формированием прорана и величиной сброса воды.

Из-за недостаточной обоснованности рекомендованных методик и больших несоответствий с экспертными оценками возникает необходимость создания новых альтернативных методов расчета. В данной статье рассмотрено 2 таких метода, разработанных в различных организациях. Первый метод косвенно учитывает материал плотины через расчет неразмывающей скорости. В основе второго метода лежит физический процесс размыва, что выгодно отличает его от других.

В качестве проверки расчетных значений были использованы данные о нескольких произошедших в последнее время катастрофических прорывах грунтовых плотин. Результаты сравнения позволяют сделать вывод о том, что

regulations, has no physical justification, because according to it the size of closure channel and the parameters of breakthrough wave do not depend on the initial volume of water in the reservoir. The calculation method in the third regulation, does not take into account such factor as the time of erosion and the results are different at times with different specified step of erosion depth. This regulation is characterized by the use of empirical relations, which have a rather narrow range of use, and a lack of account of the relationship between the formation of the closure channel and the value of water discharge.

Due to the lack of validity of the recommended calculation methods and large variation with expert estimates prescribed in the regulations, there is a need to create new alternative methods of calculation. This article discusses 2 such methods developed in various organizations. The first of them indirectly takes into account the material of the dam through calculated non-eroding velocity. The second one is based on the physical process of erosion, that is distinguishes it from others.

As a test of the calculated values, there were used data on several recent catastrophic breakthroughs of groundwater dams.

альтернативные методы дают большую точность.

На основе вышесказанного можно сделать предварительный вывод о необходимости пересмотра существующих нормативных документов.

Ключевые слова: прорывы грунтовых плотин; проран в грунтовой плотине; волна прорыва; максимальный расход прорывной волны; интенсивность размыва; безопасность гидротехнических сооружений

The comparison results allow us to conclude that alternative methods give greater accuracy.

Based on the previous, can be done a preliminary conclusion about the need to revise existing regulations.

Keywords: breakthroughs of ground dams; closure channel in the ground dam; dam break wave; the extreme discharge of the dam break wave; erosion rate; safety of water works facilities

Введение

Водохранилища, подпруженные грунтовыми плотинами, имеют широкое распространение по всему миру, так как их строительство обходится сравнительно недорого. Например, в лесостепной и степной зонах России, Украины и Казахстана на каждую малую реку было сооружено от 2 до 10 водохранилищ на каждые 100 км² водосборной площади. Однако, большинство таких плотин, построенных в 1940-1970 годах, в настоящее время находятся в аварийном состоянии. Этот факт является причиной масштабных катастрофических наводнений в результате прорыва паводковых вод через гребень плотины.

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 размеров прорана влечет за собой сброс воды из водохранилища и его последующее опорожнение.

Цель данной работы – дать оценку существующим методам расчета характеристик прорана и максимальных расходов при прорыве грунтовой плотины. В рамках поставленной цели были определены следующие задачи:

- расчет морфометрических характеристик прорана и максимальных расходов прорывной волны по выбранным методикам для конкретных объектов;

- оценка результатов расчетов по различным методикам в сравнении с экспертными оценками реальных случаев прорыва водохранилищ при размывах грунтовых плотин;
- в качестве возможного варианта расчета прорыва грунтовых плотин рассмотрены альтернативные подходы, в том числе основанные на описании физических принципов процесса размыва.

Вопрос расчета прорыва грунтовых плотин – довольно сложный и требующий учета большого числа различных факторов. Кроме объемов воды в водохранилище на момент прорыва и величины напора необходимо учитывать водно-физические и прочностные характеристики грунта плотины на момент размыва.

Параметры потока – в первую очередь скорость – будут оказывать влияние на интенсивность размыва тела плотины и увеличение прорана, что в свою очередь приведет к дальнейшему возрастанию скорости истечения через него.

Применяемые методики

В Российской Федерации для расчета параметров прорана и прорывной волны рекомендуются следующие нормативные документы: МР-81¹; ПМП-91²; РД 03-607-03³. Следует отметить, что методики расчета, представленные в соответствующих разделах ПМП-91 и МР-81, не имеет различий.

Выбор именно этих регламентирующих документов в данной работе обусловлен рядом причин. Во-первых, отсутствует анализ применимости рекомендуемых расчетных методик, используемых в России. Во-вторых, сравнение рассчитанных и экспертных оценок значений параметров прорана и прорывной волны для различных объектов позволит оценить сильные и слабые стороны применяемых методик.

Кроме того, существует ряд научных работ, в которых рассматриваются альтернативные подходы к расчету прорыва грунтовых плотин, например [Пономарчук, 2011].

¹ Методические рекомендации по определению расходов воды при проектировании переходов через водотоки в зоне воздействия некапитальных плотин. М.: ВНИИТС, 1981. 17 с. (далее – МР-81).

² Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки. М.: Трансстрой, 1992. 180 с. (далее – ПМП-91).

³ РД 03-607-03 Методические рекомендации по расчету развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов / Серия 03. Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Вып.42. М.: ГУП "НТЦ "Промышленная безопасность", 2003. 17 с. (далее – РД 03-607-03)

Расчет изменения объема воды в водохранилище при прорыве в них, равно как и в РД 03-607-03, проводится по уравнению водного баланса:

$$W_i = W_{i-1} - \int_{t_{i-1}}^{t_i} (Q_{\text{излив}} - Q_{\text{приток}}) dt, \quad (1)$$

где W_i – объем воды в водохранилище на i -ом шаге расчета, м³;
 $Q_{\text{приток}}, Q_{\text{излив}}$ – соответственно расходы притока и излива, м³/с.

Максимальный расход воды в створе плотины при ее прорыве согласно п. 4 МР-81 и п. 8.3 ПМП-91 рассчитывается по формуле:

$$Q = KBH^{3/2} = bH^{3/2}, \quad (2)$$

где B – длина плотины по урезу воды в верхнем бьефе при предельном наполнении водохранилища, м;

H – напор воды (разница отметок воды верхнего и нижнего бьефа до прорыва плотины), м;

K – коэффициент, учитывающий отношение возможной ширины прорана к длине плотины B , расчетное значение определяется согласно таблице 8.1 ПМП-91;

$b = KB$ – расчетная ширина прорана, м.

Расчетный расход воды в створе плотины при расчете по методике РД 03-607-03:

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

где b_i – ширина прорана на i -ом шаге, м;

h_i – глубина слоя воды, проходящего через проран, м;

m – коэффициент водослива, принят равным 0,31;

g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с².

Численное значение принятого выше коэффициента водослива m определяет следующие параметры прорана: прямоугольный водослив с широким порогом и нескругленным входным горизонтальным ребром и боковым сжатием $\varepsilon = 0,95$. Глубина потока на пороге водослива определена по способу Беланже [Чугаев, 1982].

Приращение ширины прорана:

$$b_i = b_{i-1} + \Delta y \frac{b_0}{y_0 + \Delta y} \quad (4)$$

За начальные условия расчета размыва элементарного прорана принимается равенство $y_0 = b_0 = h_0 = 0,5$ м. Приращение глубины прорана на каждом расчетном шаге задается постоянным и равным $\Delta y \leq y_0$.

Объекты и результаты расчетов

В качестве объектов исследования были выбраны три водохранилища, на которых происходили катастрофические прорывы, связанные с переливом через грунтовую плотину (таблица 1).

Таблица 1. Данные по рассматриваемым объектам [Бобков и др., 1999; Катастрофы конца XX века, 2001; Малик, 2009; Фролов, Волосухин, 2012]

Table 1. Data of considered objects by different literary sources

Водохранилище	Год	Страна	Объем водохранилища, млн. м ³	Площадь зеркала, млн. м ²	Высота плотины, м	Длина по гребню, м
Кокпектинское	2014	Казахстан	2,7	0,4	11	940
Тирлянское	1994	Россия	7,0	1,293	9,85	400
Киселевское	1993	Россия	37,0	200	18	1920

В связи с неполнотой информации о конкретных объектах, для непосредственных расчетов был принят ряд допущений:

- Предельная глубина прорана, который образовывался в ходе размыва в каждом из случаев, принята равной высоте плотины.
- Заложение внутреннего и внешнего откосов дамбы для каждого водохранилища задавалось одинаковым: $m = 1:3$.
- Грунт тела плотин определен как суглинки, средневзвешенный размер частиц – 0,00005 м.

Данные по Кокпектинскому водохранилищу и плотине предоставлены А.Ю. Виноградовым, обследовавшим их после прорыва в 2014 году (рисунок 1). Данные по Тирлянскому водохранилищу и Киселевской плотине взяты из [Фролов, Волосухин, 2012].



Рисунок 1. Проран в Кокпектинской земляной плотине. Катастрофа 30-31.03.2014.

Фото Виноградова А.Ю.

Figure 1. Breach in the Kokpektyn earthen dam. Accident of March 30-31, 2014.

Photo by Alexey Yu. Vinogradov

Данные по Тирлянскому водохранилищу. Различие в оцененных объемах аккумулированной в водохранилище воды (4,96 млн. м³ [Фролов, Волосухин, 2012] и 7,0 млн. м³ [Малик, 2009]) на период катастрофы видимо соответствует объему при различном наполнении водохранилища при уровнях верхнего бьефа, достигающих до гребня плотины. Объем в 8,6 млн. м³ [Бобков и др., 1999] с учетом притока воды – до 0,5 млн. м³ (120 м³/с в течение 75 минут сброса воды при прорыве) вероятно, несколько завышен. Ширина прорана, образовавшегося в результате катастрофы 7 августа 1994 года, так же оценивается авторами по-разному: от 20 до 80 м [Фролов, Волосухин, 2012].

Данные по Киселевской плотине. Разрушение Киселевской грунтовой плотины (р. Каква, Свердловская область) произошло из-за недостаточной водопропускной способности водосбросов, рассчитанных на пропуск паводка повторяемостью 1 раз в 1000 лет, равного 560 м³/с [Фролов, Волосухин, 2012]. Приток в водохранилище по «фактическим» замерам в 7 часов 30 минут 14.06.1993 достиг 1000 м³/с [Фролов, Волосухин, 2012], то есть превысил предельно допустимый почти в 2 раза. Водохранилище было переполнено и около полудня произошел прорыв дамбы (рисунки 2, 3).



Рисунок 2. Прорыв грунтовой плотины Киселевского водохранилища. 14.06.1993.
Фото В. Суворина. Источник: <https://uraloved.ru/istoriya/navodnenie-na-reke-kakva>

Figure 2. Breach of the earthen dam of the Kiselevsky reservoir. 06/14/1993.

Photo by V. Suvorin. URL: <https://uraloved.ru/istoriya/navodnenie-na-reke-kakva>



Рисунок 3. Крепление откоса верхнего бьефа плотины. Фото В. Суворина.

Источник: <https://uraloved.ru/images/mesta/sv-obl/serov/kakva-1993-9.jpg>

Figure 3. Fastening slope of the upstream dam. Photo by V. Suvorin.

URL: <https://uraloved.ru/images/mesta/sv-obl/serov/kakva-1993-9.jpg>

После непосредственного расчета по методикам ПМП-91 и РД 03-607-03 была составлена сводная таблица (таблица 2).

Таблица 2. Сводная таблица рассчитанных и наблюдаемых максимальных расходов воды и ширины прорана

Table 2. Summary table of calculated and observed maximum water discharge and width of closure channel

Водохранилища	Δh	Расходы воды Q , м ³ /с			Ширина прорана, м		
		ПМП-91	РД 03-607-03	Экспертная оценка	ПМП-91	РД 03-607-03	Наблюденные
Кокпектинское	0,01	8570	1550	1000 ± 200	235	29	60
	0,1		2075			29	
	0,5		4910			30	
Тирлянское	0,01	3160	8430	1800 ± 300	112	55	75
	0,1		10700			55	
	0,5		24000			56,5	
Киселевское	0,01	36660	42200	4800 ± 1000	480	92	70
	0,1		50900			92	
	0,5		101400			94	

Дискуссия

Методика, изложенная в МР-81 и ПМП-91, не имеет под собой физического обоснования. Расчеты параметров прорана и максимальных расходов волны прорыва отличаются от экспертных оценок в разы. Предположение о функциональной зависимости размера прорана и максимального расхода волны прорыва (таблица 3) от длины плотины представляется абсурдным.

Приведенные значения априори предопределяют невозможность использования предлагаемой методики для практических расчетов. В зависимости (2) отсутствует определяющий параметр – объем водохранилища на момент прорыва. А именно от него будут зависеть максимальный расход прорывной волны и окончательные геометрические размеры прорана.

Таблица 3. Расчетные значения максимального расхода и ширины прорана в зависимости от длины плотины

Table 3. Calculated maximum discharge and width of closure channel depending on dam length

B , м	20	50	100	200	300	500	1000	2000	5000
b , м	9,6	22	40	70	93	125	250	500	1250
Q (H=2 м), м ³ /с	15,2	34,9	63,5	111	148	198	397	794	1984
Q (H=5 м), м ³ /с	28,1	64,3	117	205	272	366	731	1462	3655

Более адекватной является пошаговая расчетная схема, прописанная в РД 03-607-03. Вместе с тем, она имеет принципиальные недостатки. Полученные характеристики прорана зависят от характеристик грунта и размывающей способности потока опосредованно через так называемую транспортирующую способность потока. В контексте РД 03-607-03, транспортирующая способность потока определяется безразмерной эмпирической зависимостью:

$$\mu = 0,01 \left(\frac{V_{кр} - V_0}{3W_0} \right)^4 \left(\frac{d}{R_i} \right)^{1/6},$$

где $V_{кр} = 2,63\sqrt{h_i}$, м/с;

V_0 – неразмывающая скорость [Кадацкая и др., 2019], рассчитанная по зависимости Ц.Е. Мирцхулава для связных грунтов, учитывающей сцепление грунта, м/с;

$W_0 = \frac{gd^2\rho_s}{18\nu}$ – гидравлическая крупность размываемого грунта, м/с;

ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с;

R – гидравлический радиус прорана, м;

d – средневзвешенный диаметр частиц грунта, мм.

Расчет линейных размеров прорана в зависимости от различных вариантов приращений глубины размыва на каждом расчетном шаге приведен в таблице 4. Предложенная схема не может быть работоспособной, если в зависимости от шага приращения глубины при одном и том же расчетном значении глубины размыва ширина прорана отличается в разы. Кроме того, в схеме отсутствует фактор времени размыва.

Таблица 4. Расчетные значения ширины прорана в зависимости от итерационного шага приращения глубины

Table 4. The calculated values of the width of breakthroughs depending on the iterative step of the depth increment

расчетная глубина, м шаг приращения глубины, м	y	0,5	1	2	3	5	7	9	10	12
$\Delta y = 0,5$	b	0,5	0,8	1,3	1,8	2,8	3,8	4,8	5,3	6,3
$\Delta y = 0,1$	b	0,5	0,9	1,8	2,6	4,3	5,9	7,6	8,4	10,1
$\Delta y = 0,01$	b	0,5	0,99	1,97	2,95	4,91	6,87	8,83	9,81	11,77

Альтернативные методики

Рассмотрим результаты расчетов по разрабатываемой в НПО «Гидротехпроект» физической модели размыва (далее – метод ГТП), основанной на следующих посылах. Скорость размыва прямо пропорциональна энергии струи потока и обратно пропорциональна удерживающему напряжению размываемого грунта тела плотины, площади размыва и времени, затраченного на размыв.

В результате получена следующая зависимость:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{E}{\tau_{y0} S \cdot t}, \quad (5)$$

где h – мощность размываемого слоя за расчетный шаг времени, м;

t – время, с;

S – площадь размываемого участка, м²;

E – энергия струи потока, кг·м²/с²;

τ_{y0} – удерживающее напряжение, кг/м·с²;

$$\tau_{y0} = \rho_e (1 - \varepsilon) g h \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \quad (6)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта, град;

c – сцепление грунта, кг/м·с².

Проинтегрируем зависимость (5) с учетом того, что $E = \frac{mV^2}{2}$:

$$(c + h\rho_z g(1 - \varepsilon)tg\varphi)dh = \frac{mV^2}{2(B + 2H_g)Lt} dt$$

$$\int (c + h\rho_z g(1 - \varepsilon)tg\varphi)dh = \int \frac{mV^2}{2(B + 2H_g)Lt} dt$$

$$ch + \frac{h^2}{2} \rho_z g(1 - \varepsilon)tg\varphi = \frac{mV^2}{2(B + 2H_g)L} \ln t + C$$

Граничные условия
 $V = 0, h = 0 \rightarrow C = 0$

Окончательно

$$ch + \frac{h^2}{2} \rho_z g(1 - \varepsilon)tg\varphi = \frac{mV^2}{2(B + 2H_g)L} \ln t$$

Результаты расчета по представленной методике приведены в таблице 5 в сравнении с экспертными оценками и наблюдаемыми параметрами. Наблюдаемое время развития прорана в дамбе Киселевского водохранилища приведено по косвенным данным.

Таблица 5. Таблица рассчитанных по методу ГТП и экспертных оценок и наблюдаемых параметров прорывной волны и ширины прорана

Table 5. The table calculated by the method of Gidrotehproekt and the expert estimates and observed parameters of the dam break wave and the width of the breakthroughs

Водохранилища	Расходы воды Q, м ³ /с		Ширина прорана, м		Время, мин	
	Метод ГТП	Экспертная оценка	Метод ГТП	Наблюдаемые	Метод ГТП	Наблюдаемые
Кокпектинское	1800	1000 ± 200	51	60	43	45
Тирлянское	1980	1800 ± 300	72	75	85	80
Киселевское	5000	4800 ± 1000	116	70	130	180(?)

Следующий метод расчета описан в [Пономарчук, 2011]. Для расчета ширины прорана B_t предложена зависимость (7), где показатели степени при значении напора и коэффициент C являются эмпирическими.

$$B_t = C \sqrt{g} \int_0^t \frac{h_t^{4,5}}{w_{y0}^2} \cdot \left(1 - \frac{h_n}{h_t}\right)^{0,3} dt \quad (7)$$

Расход через проран рассчитывается по формуле водослива практического профиля [Чугаев, 1982]:

$$Q_{изл.t} = -\frac{dW_t}{dt} = m \varepsilon \sigma_n B_t \sqrt{g h_t^{3/2}} \quad (8)$$

где h_t – напор, м;
 h_n – напор, соответствующий неразрывающей скорости, м;
 W_t – объем воды в водохранилище на момент времени t , м³;
 w_{y0} – площадь поперечного сечения плотины, м²;
 m – коэффициент водослива (0,32 ÷ 0,38);
 ε – коэффициент бокового сжатия;
 σ_n – коэффициент подтопления [Чугаев, 1982].

Результаты расчета по представленному в [Пономарчук, 2011] методу приведены в таблице 6 в сравнении с экспертными оценками и наблюдаемыми параметрами.

Таблица 6. Таблица рассчитанных по [Пономарчук, 2011] и экспертных оценок и наблюдаемых параметров прорывной волны и ширины прорана

Table 6. The table calculated by the model and the expert estimates and observed parameters of the dam break wave and the width of the breakthroughs

Водохрани- лище	Расходы воды Q, м ³ /с		Ширина прорана, м		Время, мин	
	[Пономар- чук, 2011]	Экспертная оценка	[Пономар- чук, 2011]	Наблю- денные	[Пономар- чук, 2011]	Наблю- денные
Кокпектин- ское	1400	1000 ± 200	58	60	50	45
Тирлянское	1640	1800 ± 300	83	75	150	80
Киселевское	6150	4800 ± 1000	131	70	80	180(?)

Выводы

1. Методики, рекомендованные к применению (МР-81; ПМП-91; РД 03-607-03) не имеют под собой физического обоснования (ПМП-91) или основаны на ошибочных постулатах (РД 03-607-03). Ошибки в расчетах, проведенных по этим методикам, могут составлять 1000%, что практически недопустимо. Методики не учитывают объем водохранилища на момент прорыва (ПМП-91), построены на эмпирических, не отвечающих конкретным условиям соображениях (ПМП-91 и РД 03-607-03). Результаты расчета в разы отличаются друг от друга в зависимости от выбранного шага приращений глубины (РД 03-607-03).
2. Разрабатываемая в НПО «Гидротехпроект» методика основана на описании физики процесса размыва. Расчетные параметры хорошо согласуются с измеренными в реальных условиях.
3. Методика, описанная в [Пономарчук, 2011] также дает хорошие результаты. Параметры волны прорыва и прорана малых водохранилищ по этой методике имеют лучшую сходность с измеренными. Большую погрешность методика дает только при расчете Киселевской катастрофы.
4. В случае Киселевской катастрофы завышенное значение расчетной ширины прорана по сравнению с измеренной объясняется креплением верхового откоса железобетонными плитами.

Литература

References

- Бобков С.Ф., Боярский В.М., Векслер А.Б., Швайнштейн А.М. Основные факторы учета пропускной способности гидроузлов при декларировании их безопасности // Гидротехническое строительство. 1999. №4. С. 2-9.
- Bobkov S.F., Boyarskii V.M., Veksler A.B., Shvainshtein A.M. Osnovnye faktory ucheta propusknoi sposobnosti gidrouzlov pri deklarirovanii ikh bezopasnosti [The main factors for taking into account the capacity of waterworks when declaring their safety] *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo], 1999, no. 4, pp. 2-9. (In Russian).
- Кадацкая М.М., Виноградов А.Ю., Кацадзе В.А., Бельский Ю.И., Ба- Chugaev R.R. *Gidravlika: uchebnik dlya vuzov* [Hydraulics: a textbook for high schools]. Leningrad, Publ. Energoizdat, 1982. 672 p. (In Russian).

чериков И.В., Хвалев С.В., Каляшов В.А. Анализ методов расчета неразмывающей скорости при проектировании водопропускных и водоотводных сооружений лесного хозяйства // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 227. С. 174-187.

DOI: [10.21266/2079-4304.2019.227.174-187](https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.227.174-187)

Катастрофы конца XX века / Под ред. В.В. Владимирова. М.: Издательство Геополитика, 2001. 400 с.

Малик Л.К. Чрезвычайные ситуации, связанные с гидротехническим строительством ретроспективный обзор // Гидротехническое строительство. 2009. №12. С. 2-16

Пономарчук К.Р. Оценка параметров развития прорана при разрушении грунтовой плотины // Природообустройство. 2011. №3. С. 77-82.

Чугаев Р.Р. Гидравлика: учебник для вузов. Л.: Энергоиздат, 1982. 672 с.

Фролов Д.И., Волосухин В.А. Совершенствование российского законодательства по безопасности гидротехнических сооружений // Бюлле-

тень «Исползование и охрана природных ресурсов в России» [Scientific, informative and analytical bulletin «Use and protection of natural resources of Russia»], 2012, no. 6, pp. 17-21. (In Russian).

Kadatskaya M.M., Vinogradov A.Yu., Katsadze V.A., Belenkiy Yu.I., Bacherikov I.V., Hvalev S.V., Kalyashov V.A. Analiz metodov rascheta nerazmyvayushchei skorosti pri proektirovanii vodopropusknykh i vodootvodnykh sooruzhenii lesnogo khozyaistva [Analysis of methods for calculating non-eroding speed in the design of culverts and drainage forestry facilities]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii* [Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoy Akademii], 2019, is. 227, pp. 174-187 (In Russian; summary in English). DOI: [10.21266/2079-4304.2019.227.174-187](https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.227.174-187)

Katastrofy kontsa XX veka [Disasters of the End of the 20th Century] Ed. V.V. Vladimirov. Moscow, Publ. Geopolitika, 2001. 400 p. (In Russian).

Malik L.K. Chrezvychainye situatsii, svyazannye s gidrotekhnicheskim stroitel'stvom retrospektivnyi obzor [Emergencies related to hydraulic engineering construction retrospective review]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo], 2009, no. 12, pp. 2-16. (In Russian).

Ponomarchuk K.R. Otsenka parametrov razvitiya prorana pri razrushenii gruntovoi plotiny [Assessment of parameters of closure channel development at destruction of earth dams]. *Prirodoobustroistvo* [Environmental

ть «Использование и охрана при- *Engineering*], 2011, no. 3, pp. 77-82. (In Russian; ab-
родных ресурсов в России». 2012. stract in English).
№6. С. 17-21