

1. **Левченко Г. П.** Гидрология и сельскохозяйственные мелиорации. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 247 с.
2. **Будыко М. И.** Климат и жизнь. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 472 с.
3. **Чирков Ю. И.** Агrometeorология. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 320 с.
4. **Шашко Д. И.** Агроклиматическое районирование СССР. – М.: Колос, 1967. – 335 с.
5. **Иофин З. К.** Норма годового стока рек Кубы (на примере восточных провинций): дис. ... канд. геогр. наук. – Одесса: Одесский гидрометеорологический институт, 1990. – 236 с.
6. **Иофин З. К.** Новый подход к определению составляющих водного баланса / Труды VI Всесоюзного гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеиздат, 2004. – С. 63–67.

7. Агроклиматические ресурсы Вологодской области. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 185 с.

Материал поступил в редакцию 15.02.11.

Иофин Зиновий Константинович, кандидат географических наук, доцент кафедры «Комплексное использование и охрана природных ресурсов»

E-mail: pirit35@yandex.ru

Лихачева Ольга Ивановна, доцент кафедры «Комплексное использование и охрана природных ресурсов»

Тел. 8-921-235-28-76

Чудинова Екатерина Александровна, младший научный сотрудник инновационно-технологического центра

Тел. 8-909-598-58-45

E-mail: chudinova.katerina@yandex.ru

УДК 502/504:627.82.034.93

К. Р. ПОНОМАРЧУК

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАЗВИТИЯ ПРОРАНА ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ

Исследован процесс формирования и развития прорана при размыве грунтовых плотин. Дана оценка влиянию различных факторов на характер и динамику исследуемого явления. Разработана математическая модель и программа расчета формирования прорана при разрушении грунтовой плотины.

Аварии на грунтовых плотинах, формирование и развитие прорана, безопасность гидротехнических сооружений.

The process of closure channel formation and development at earth dams washing is studied. The influence of different factors on the character and dynamics of the researched phenomena is analyzed. There is developed a mathematical model and estimation program of closure channel formation at destruction of the earth dam.

Accidents at earth dams, formation and development of closure channel, safety of hydraulic structures.

По данным Международной комиссии по большим плотинам, основные причины аварий на грунтовых плотинах следующие: недостаточно тщательные изыскания грунтов основания и соответственно ошибки при проектировании фундаментов сооружений

плотины – 55 % случаев аварий, прохождение паводка через водосбросы – 23 %, непрочность конструкции – 14 %, другие причины – 8 % [1].

Для оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) используется

терминология Российского регистра ГТС (далее – Регистр) по 4 категориям: нормальный, пониженный, неудовлетворительный и опасный [2]. Согласно регистру, под уровнем безопасности ГТС понимают техническое состояние сооружения с учетом качества его эксплуатации. Например, неудовлетворительный и опасный уровни безопасности предполагают обязательный капитальный ремонт с целью предотвращения катастрофических последствий при разрушении частей гидротехнического сооружения.

Наиболее опасными являются аварии, связанные с прорывом напорного фронта, что приводит к образованию прорана и возникновению непредвиденного паводка в нижнем бьефе гидроузла. Такие аварии обычно сопровождаются значительными экономическими, экологическими и социальными потерями и, самое страшное, человеческими жертвами.

Причины возникновения подобных аварий обусловлены в основном неправильной эксплуатацией и неудовлетворительным состоянием гидротехнических сооружений: повреждением конструкций (суффозия, образование трещин, оползание откосов, опрокидывание), переливом через гребень (недостаточная пропускная способность водосбросов, оползни берегов в пределах водохранилища, ошибки эксплуатационного персонала), терактами, военными действиями.

Начало образования прорана обычно связано с локальной аномалией строения грунтовой плотины или ее местным повреждением, что в дальнейшем приводит к развитию прорана во времени. Механизм начального периода развития прорана в зависимости от причины аварии может иметь различный характер. Однако после образования первичного отверстия, имеющего обычно треугольную форму (до достижения основания плотины), дальнейшее развитие прорана во всех случаях происходит идентично.

Гидрограф излива воды через проран зависит от изменения во времени параметров прорана в напорном фронте (его формы и размеров, скорости развития) при заданных граничных условиях (параметрах водохранилища, приточности, конструкции плотины, геологического строения, топографии местности и т.д.). Эта характеристика входит в условие однозначности математической модели волны излива,

обычно представленной уравнениями Сен-Венана. От точности предсказания гидрографа излива зависит надежность прогноза параметров волны излива (изменения во времени глубины потока, скоростей течения и т.д.) в различных областях затопления, сведения о которых необходимы для выбора места размещения хозяйственных объектов, разработки противопаводковых мероприятий, составления плана действий в случаях аварии, оценки последствий прохождения волны излива, страхования подпорных сооружений и т.д.

Актуальность решения данной задачи возрастает в связи со все более частым применением в конструкциях грунтовых плотин речных гидроузлов – так называемых «плавких вставок», являющихся аварийными водосбросами. Процесс смыва тела «плавкой вставки» не отличается в принципе от процесса формирования прорана в грунтовой плотине.

В большинстве предложенных моделей формирования прорана для определения эрозии используются известные зависимости транспортирующей способности потока от его скорости или касательного напряжения, полученные, строго говоря, для размыва дна равномерного потока. Вместе с тем, процесс развития прорана, особенно на второй стадии его формирования, происходит в основном за счет квантованного обрушения его откосов, и применение таких зависимостей в данном случае неправомерно.

Анализ случаев реальных аварий на грунтовых плотинах, сопровождавшихся прорывом напорного фронта, и статистические данные позволили сделать следующие выводы:

в большинстве случаев процесс развития прорана длится от 0,5 до нескольких часов, что влияет на параметры прорывных паводков;

размыв прорана, как правило, происходит по глубине до основания плотины (не происходит размыва основания);

заложение боковых откосов прорана в среднем близко к 2:1;

несмотря на существенную вариацию параметров тела грунтовых плотин, приближенная оценка характеристик прорана может быть произведена без учета данных конструктивных особенностей.

Изложенные обстоятельства явились

причиной проведения исследований, направленных на изучение процесса прорыва грунтовых плотин и разработку методики прогноза формирования прорана во времени.

Цель экспериментов – решение следующих задач: качественное описание процесса развития прорана в теле грунтовой плотины, построение математической модели формирования прорана, уточнение зависимости для интенсивности расширения прорана во времени, определение влияния различных факторов (высоты и удельного объема тела плотины, гранулометрического состава грунта, параметров водохранилища и т.д.) на интенсивность и объем выноса грунта, оценка зависимости параметров волны разлива от интенсивности расширения прорана, определение гидрографа разлива через проран при различных значениях влияющих факторов.

До постановки экспериментов на основании теории размерностей была определена структура зависимости интенсивности развития прорана от напора на сооружение, геометрических характеристик тела грунтовой плотины и других физических величин, определяющих процесс размыва. В соответствии со способом Рэля зависимость для интенсивности расширения прорана была получена в следующем виде:

$$\frac{dB}{dt} = C \cdot \frac{g^{0,5} h_t^{2,5}}{w_{уд}} \cdot \left(\frac{w_{уд}}{h_t^2} \right)^n \left(1 - \frac{h_n}{h_t} \right)^p, \quad (1)$$

где dB/dt – интенсивность расширения прорана во времени; g – ускорение гравитации; h_t – разность между уровнем воды в водохранилище и отметкой дна прорана (действующий напор); w – площадь поперечного сечения плотины; $h_{уд}$ – напор, соответствующий неразмывающей скорости. (Эмпирический коэффициент C и показатели степеней n и p определяли на основании экспериментальных данных).

Экспериментальные исследования были проведены в лаборатории отдела гидравлических исследований АО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» на модели грунтовой плотины высотой 30, 45 и 60 см с шириной гребня 10 см и заложением откосов 1:3 и 1:2 (1:3). Модели плотин были изготовлены из кварцевого песка двух составов: однородного мелкозернистого песка со средней крупностью 0,15 мм и разнородного среднезернистого песка со средней крупностью 0,22 мм. В опытах фиксировали изменение во времени уровня воды в бьефах модели плотины, расход разлива через проран, размеры прорана.

Качественно процесс развития прорана в грунтовой плотине, имеющей однородный состав, по результатам визуальных наблюдений (в тех случаях, когда образование прорана связано с переливом воды через гребень), протекает следующим образом.

На участке начального перелива снос грунта начинается на низовой грани, где имеет место кривая спада потока, на уровне перехода к равномерному течению. После начала разрушения низового откоса размыв тела плотины распространяется вверх по течению, в сторону гребня, при этом на низовом откосе образуется ложбина. При пересечении этой ложбиной гребня плотины, вследствие увеличения действующего напора и ширины прорана, происходит увеличение расхода истечения через проран. При углублении врезки переливающегося потока в тело плотины боковые откосы прорана могут потерять устойчивость, и развитие прорана происходит как за счет смыва грунта с обтекаемых поверхностей, так и за счет обрушения откосов прорана. Описанная первая стадия формирования прорана заканчивается при достижении дном прорана основания плотины поперек всей ее подошвы.

На второй стадии формирования прорана происходит его боковое расширение, связанное с квантованным обрушением боковых откосов. Масса грунта по трещине, пересекающей тело плотины, обрушается в проран, причем часть ее во взвешенном состоянии сносится потоком в нижний бьеф, а другая откладывается у основания откоса, обеспечивая на некоторое время его устойчивость. Постепенно грунт у основания откоса сносится изливающимся потоком, и откос снова теряет устойчивость. В процессе развития прорана вследствие опорожнения водохранилища уровень воды в верхнем бьефе падает (действующий напор в проране уменьшается). При определенном соотношении между действующим напором и шириной прорана расход истечения достигает максимального значения. Затем, вследствие падения напора, расход уменьшается и интенсивность расширения прорана снижается. Процесс прекращается, когда водохранилище опорожняется либо при достижении скоростями потока в проране неразмывающих для грунта значений. На рис. 1 представлено изменение

во времени ширины прорана для условий проведенных опытов. Кривые B_t имеют ступенчатый характер, связанный с квантованным обрушением откосов прорана. При отсутствии препятствий для бокового расширения проран развивается симметрично относительно начальной прорези. Поэтому для опытов, в которых начальная прорезь размещается у боковой стенки (на рис. 1 опыты 7, 8, 12, 15), при перенесении результатов на графики зафиксированная ширина прорана удваивается. Как видно из рис.1, каждый опыт

имеет свои особенности, но в целом характер и форма кривых не имеют существенных отличий. Отмечено, что с увеличением высоты плотины значения конечной ширины прорана уменьшаются при прочих равных условиях. В таблице приведены данные сравнения экспериментальных значений ширины проранов при различной высоте плотины с расчетными значениями, подсчитанными по эмпирическим формулам, полученным в результате статистической обработки натуральных данных.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений ширины прорана

№ опыта	Высота плотины	Начальный напор	Площадь поперечного сечения плотины	Объем излива	Ширина прорана		$\frac{B_{\max}^{\text{факт}}}{B_{\max}^{\text{расч}}}$
	$H_{\text{пл}}, \text{ м}$				$h_0, \text{ м}$	$w_{\text{уд}}, \text{ м}^2$	
1	0,30	0,28	0,26	63,3	1,98	1,47	1,35
6	0,45	0,40	0,55	109,1	1,70	1,29	1,32
7	0,60	0,53	0,96	146,2	1,52	1,11	1,37

Результаты исследований подтверждают тенденцию уменьшения ширины прорана с увеличением высоты плотины; значения максимальной ширины прорана $B_{\max}^{\text{расч}}$, рассчитанные по статистической зависимости, меньше фактических значений $B_{\max}^{\text{факт}}$ в среднем в 1,35 раза (см. таблицу). Это объясняется тем, что модели плотин в экспериментальных условиях имеют однородное строение, а интегральные зависимости получены в результате обработки статистических данных о реальных прорывах плотин, включающих противифльтрационные элементы.

При составлении математической модели развития прорана ступенчатым характером процесса пренебрегли. На рис. 2 показаны средняя сглаженная кривая зависимости $B_t = f(t)$ и соответствующая ей кривая изменения во времени интенсивности расширения прорана $dB/dt = f(t)$ для плотины высотой $H = 0,6 \text{ м}$. Эти кривые имеют явно выраженный максимум в начале процесса, соответствующий началу второй стадии, где ширина прорана (если не учитывать скачков, связанных с обрушением откосов) асимптотически приближается к конечному значению B_{\max} .

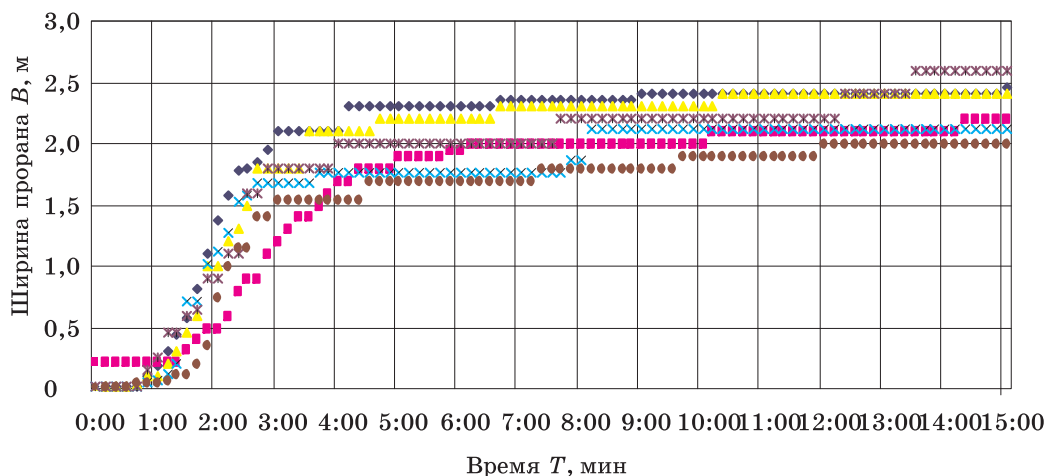


Рис. 1. Характер фактического расширения прорана по результатам опытов ($H_{\text{пл}} = 0,6 \text{ м}$): ♦ опыт 7 (пр. сбоку); ■ опыт 8 (пр. сбоку $H_0 = 0,2 \text{ м}$; $B_0 = 0,22 \text{ м}$); ▲ опыт 11 (пр. в центре); × опыт 12 (пр. сбоку; $m_1 = m_2 = 1:3$); * опыт 15 (пр. сбоку, м. з); • опыт 16 (пр. в центре, м. з)

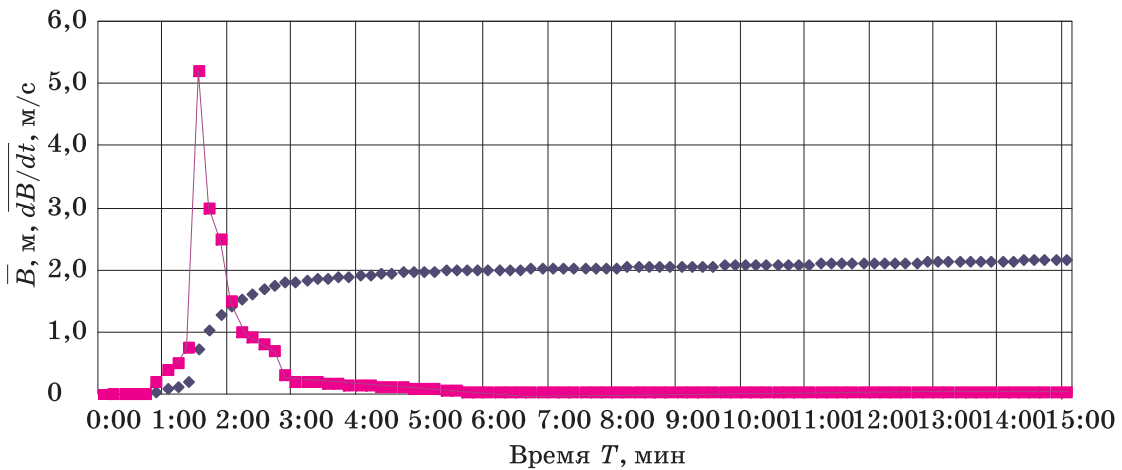


Рис. 2. Характер усредненного процесса развития прорана: B – средняя ширина прорана, м; dB/dt – интенсивность развития прорана во времени, м/с; $\blacklozenge B$; $\blacksquare dB/dt \cdot 10$

На основе обработки результатов исследований сделаны следующие выводы.

Процесс развития прорана можно разделить на две стадии; время начальной стадии образования прорана (до основания плотины) невелико по сравнению с общим временем размыва; заложение откосов прорана близко к 2:1.

Пик расхода воды, проходящей через проран, приходится на вторую стадию, что позволяет считать именно эту стадию решающей при оценке гидрографа излива через проран.

Сравнительная оценка графиков фактического расширения прорана позволила прийти к заключению о том, что интенсивность развития ширины прорана во всех случаях экспериментов имеет идентичный характер.

На основании экспериментальных данных получены численные значения коэффициента C и показателей степеней n и p , соответствующие минимуму среднеквадратичных отклонений расчетных значений ширины прорана от экспериментальных.

На основании теории размерностей и условия минимального отклонения расчетной ширины прорана от экспериментальных данных зависимость для интенсивности развития прорана может быть представлена так:

$$\frac{dB}{dt} = 0,06 \cdot \frac{g^{1/2} h_t^{5/2}}{w_{уд}} \cdot \left(\frac{h_t^2}{w_{уд}^2} \right) = 0,06 \cdot \frac{g^{1/2} h_t^{9/2}}{w_{уд}^2}. \quad (2)$$

Зависимость (2) является одним из основных уравнений, входящих в состав математической модели развития прорана.

Модель развития прорана состоит из

пяти уравнений, описывающих динамику процесса (размерность времени – с, размерность длины – м):

Уравнение 1. Ширина прорана в момент времени t :

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

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

$$Q_{изл.t} = - \frac{dW_t}{dt},$$

где W_t – объем воды в водохранилище в момент времени t может быть определен по зависимости для расхода воды через водослив с широким порогом:

$$Q_{изл.t} = - \frac{dW_t}{dt} = m \varepsilon \sigma_n B_t \sqrt{g} h_t^{3/2}, \quad (4)$$

где m – коэффициент расхода водослива (для второй стадии развития прорана – истечение через трапецеидальное отверстие как для водослива с широким порогом, $m = 0,32 \dots 0,38$); ε – коэффициент бокового сжатия; σ_n – коэффициент подтопления, отличающийся от единицы при $h_{н6}/h_t > 0,8$ ($h_{н6}$ – глубина в нижнем бьефе над порогом прорана).

Уравнение 3. Объем воды в водохранилище в момент времени t :

$$W_t = W_0 - \int_0^t (Q_{изл.t} - Q_{пр.t}) \cdot dt, \quad (5)$$

где W_0 – объем воды в водохранилище в начале излива; $Q_{пр.t}$ – расход приточности в водохранилище в момент времени t .

Уравнение 4. Зависимость объема воды в водохранилище от уровня верхнего бьефа (УВБ):

$$W_t = f(\text{УВБ}_t). \quad (6)$$

Последняя зависимость определяется топографическими изысканиями для данного объекта и может иметь различную

форму. В расчетах зависимость (6) обычно аппроксимируется степенной связью:

$$W_t = kh_t^m, \quad (7)$$

где показатель степени m в зависимости от рельефа может составлять $m = 1...4$. Значения коэффициента k при известном значении m могут быть определены по начальным значениям W_0 и h_0 .

Уравнение 5. Уровень воды в верхнем бьефе УВБ_т можно записать так:

$$\text{УВБ}_t = \nabla_{\text{осн}} + h_t, \quad (8)$$

где $\nabla_{\text{осн}}$ – отметка основания плотины.

Система из пяти уравнений (3)...(8), составляющих математическую модель формирования прорана, содержит пять искомых функций – B_t , $Q_{\text{излт}}$, W_t , h_t и УВБ_т, т.е. система замкнута.

Предлагаемая методика составлена без учета размыва основания плотины и волновых явлений в водохранилище. По данной модели составлена компьютерная программа расчета характеристик развития прорана с возможностью построения графиков динамики процесса, вошедшая в общую программу расчета прорывного паводка «БОР».

Для определения надежности разработанной методики было выполнено сопоставление между интегральными характеристиками, полученными расчетом по данной методике, и имеющимися данными о реально произошедших прорывах грунтовых плотин.

Имея в виду очевидную неопределенность величин, характеризующих развитие проранов в натуральных условиях, некоторую приближенность подходов при составлении методики, результаты расчетов (с ее использованием) следует считать оценочными. По мнению автора, полученные результаты определения гидрографа излива через проран в грунтовой плотине ближе к натурным данным, так как предложенная методика основана на систематических экспериментах и проверена по данным реальных прорывов плотин.

Выводы

Предложена модель процесса развития прорана и излива воды через него, позволяющая в первом приближении оценить гидрограф излива, сведения о котором необходимы для оценки параметров волны излива.

На основании фактических данных о прорывах грунтовых плотин определены эмпирические связи для интегральных характеристик образовавшихся проранов.

Разработана методика расчета параметров развития прорана и гидрографа излива, применение которой в практике хозяйствования позволит повысить безопасность гидротехнических сооружений.

1. Loukola E., Kuusisto E., Reiter P. The Finnish Approach to Dam Safety. Hydropower Dam Construction Journal. – 1985. – P. 98–102.

2. О ведении Российского регистра гидротехнических сооружений: инструкция; зарегистрирована Минюстом России 05.08.1999 г. за № 1858. – 12 с.

3. Аварии и повреждения больших плотин: обзор. доклад / Розанов Н. С. [и др.] / Материалы XIII Международного конгресса по большим плотинам в Нью-Дели в 1979 году. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 71–80.

4. Прудовский А. М., Пономарчук К. Р. Методика расчета развития во времени прорана в грунтовой плотине/ Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидравлических сооружений: материалы Международного симпозиума. – СПб, 2002. – С. 145–151.

Материал поступил в редакцию 07.02.11.

Пономарчук Карина Рюриковна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидрология, метеорология и регулирование стока»

Тел. 8 (499) 976-17-45

E-mail: k.ponomarchuk@polit.mcx.ru