

УДК 627; 630*3; 556

DOI: 10.34753/HS.2020.2.3.305

КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РУКОВОДЯЩИХ ДОКУМЕНТОВ ПО РАСЧЁТУ РАЗВИТИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АВАРИЙ

А.Ю. Виноградов^{1,2}, В.А. Обязов¹,
О.В. Зубова², М.М. Кадацкая¹, А.В. Кучмин¹

¹ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай,
Россия; ²ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский
государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, Россия
gd@npogtp.ru

Аннотация. В руководящих документах Российской Федерации (РД 03-607-03 и РД 09-391-00) представлены методики расчёта развития гидродинамических аварий на накопителях и хранилищах жидких промышленных и производственных отходов. Поскольку аварии на таких объектах представляют собой прорыв плотины с образованием прорана в ее теле, для расчётов используется методическая основа, разработанная для грунтовых плотин любого назначения. Это позволило рассмотреть применимость указанных документов к плотине водохранилища на реке Кокпекты в Казахстане, на которой произошла авария в марте 2014 года. Анализ применимости рассматриваемых документов показал, что численные значения большинства параметров, рассчитанных по ним, не соответствуют действительности и/или не имеют физического смысла, их нельзя использовать на практике. В частности, в предлагаемых документах не учитывается время на образование эрозионных рытвин, что приводит к ошибке оценки времени образования прорана на порядок. В рассматриваемых руководящих документах принята прямоугольная форма прорана, хотя на практике в большинстве случаев она трапециевидная. Сравнение расчётных и измеренных размеров прорана показало их различие в два раза. Даже результаты расчёта размеров прорана по

CRITICAL ANALYSIS OF THE GUIDELINES ON THE CALCULATION OF HYDRODYNAMIC ACCIDENTS

Alexey Yu. Vinogradov^{1,2}, Viktor A. Obyazov¹,
Olga V. Zubova², Mariya M. Kadatskaya¹,
Alexey V. Kuchmin¹

¹Scientific and Industrial Research Association
Gidrotehproekt, Valday, Russia; ²Saint Petersburg
State Forest Technical University, St. Petersburg,
Russia
gd@npogtp.ru

Abstract. The guidance documents of the Russian Federation (RD 03-607-03 and RD 09-391-00) present calculation methods of hydrodynamic accidents in storage tanks and facilities for liquid industrial and waste. Because the accidents at such facilities represent a breakthrough of a dam with the formation of a hole in its body, there is used a methodological framework developed for ground dams of any purpose for calculations. This fact made it possible to consider the applicability of these documents to the reservoir dam on the Kokpekty River in Kazakhstan, where an accident occurred in March 2014.

An analysis of the applicability of the considered guidance documents showed that the values of the most parameters calculated by them do not correspond to reality and / or have no physical sense, they cannot be used in practice. In particular, the considered documents do not take into account the time for the formation of erosion tracks, which puts to an error (by an order of magnitude) in the estimating time of a break formation. There is taken the rectangular shape of the tracks in the considered guidelines, although in practice it is trapezoidal in most cases. Comparison of the calculated and measured sizes of the erosion tracks showed their difference by two times. Even the size of the erosion track according to the proposed formula may differ by 25% depending on the selected calculation step. RD 03-607-03 and RD 09-391-00 give different

предлагаемой формуле в зависимости от выбранного расчётного шага могут отличаться на 25%. В РД 03-607-03 и РД 09-391-00 приводятся разные формулы для расчёта гидравлической крупности, что приводит к различию в результатах в 1,65 раза. Кроме того, при расчёте гидравлической крупности вместо динамической используется кинематическая вязкость. Одна из важнейших характеристик – транспортирующая (размывающая) способность потока в рассматриваемых документах безразмерна и не имеет физического смысла. Обращает также на себя внимание, что предлагаемые руководящие документы, в нарушение ГОСТ 8.417-2002, не только используют нестандартизированные величины размерностей, но даже в одной из формул в качестве сомножителей соседствуют метры, сантиметры и миллиметры.

Таким образом, РД 03-607-03 и РД 09-391-00 не рекомендуется использовать для расчётов развития гидродинамических аварий и зон затопления, данные документы требуют немедленного пересмотра.

Ключевые слова: проран; неразмывающая скорость; гидравлическая крупность; транспортирующая (размывающая) способность потока; гидродинамическая авария; грунтовая плотина

Введение

В лесостепной и степной зонах России, Украины и Казахстана в 30-80 годах XX века было сооружено около 30 000 малых водохранилищ, водоподпорными сооружениями для которых послужили грунтовые плотины. Такие водохранилища получили широкое распространение, поскольку их строительство было самым дешёвым. Однако большинство плотин этих водохранилищ имеют срок эксплуатации 40-80 лет, последние 30 лет практически не обслуживаются и в настоящее время находятся в аварийном состоянии.

Этот факт является причиной ежегодных катастрофических наводнений в результате прорыва паводковых вод с образованием прорана в теле грунтовой плотины. На сегодняшний день

formulas for hydraulic size calculating, which puts to a difference by 1.65 times. Moreover, there is used the kinematic viscosity instead of the dynamic one while the hydraulic size calculating. One of the most important characteristics, the transporting (erosion) flow ability, in the considered documents is dimensionless and has no physical sense. It is also notable that the proposed guidance documents, in violation of GOST 8.417-2002, use non-standardized dimension values and in the same formula coexist as multiplier meters, centimeters and millimeters.

Thus, RD 03-607-03 and RD 09-391-00 are not recommended for use in calculation of hydrodynamic accidents and flooding zones, these documents require immediate revision.

Keywords: erosion track; non-eroding velocities; hydraulic size; the transporting (erosion) flow ability; hydrodynamic accidents; ground dam

в некоторых областях России и Украины разрушено до 20% таких сооружений, в Казахстане – до 80%.

Существует несколько методик расчётов морфометрических характеристик прорана и максимальных расходов прорывной волны [Виноградова и др., 2019]. Часть из них [Пономарчук, 2011] описана в специальной литературе и используется только в специальных расчётах, часть представлена в нормативных документах и рекомендована, в частности, для расчёта параметров прорана и количественной оценки уровня безопасности при гидродинамических авариях. К сожалению, в специализированной литературе недостаточно работ, посвящённых сравнительной оценке соответствия рассчитанных по различным

методикам параметров гидродинамической аварии измеренным, отсутствует также оценка их пригодности для расчётов.

В данной работе рассмотрим следующие действующие на сегодняшний день в России руководящие документы: РД 03-607-03 «Методические рекомендации по расчёту развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов»¹ (далее – РД 03-607-03) и РД 09-391-00 «Методика расчёта зон затопления при гидродинамических авариях на хранилищах производственных отходов химических предприятий»² (далее – РД 09-391-00). Рассматриваемые документы предназначены для расчётов параметров прорана и зон затопления при гидродинамической аварии на эксплуатируемых и проектируемых накопителях и хранилищах жидких отходов, шламов, стоков, технических вод предприятий и организаций, поднадзорных Госгортехнадзору России.

При соответствующем обосновании методики, изложенные в них, могут быть использованы для расчёта параметров прорана и зон затопления при авариях на грунтовых плотинах предприятий, подконтрольных иным органам надзора.

Цель данной работы – оценить возможность обоснования использования рассматриваемых руководящих документов для расчёта параметров прорана и зон затопления при авариях на любых грунтовых плотинах, в частности, на примере прорыва Кокпектинского водохранилища.

Объект исследования

Работоспособность рассматриваемых руководящих документов для оценки аварий на грунтовых плотинах водохранилищ нами проверялась на примере катастрофы на реке

Кокпекты (Казахстан) произошедшей 31 марта 2014 года.

Кокпектинское водохранилище сооружено в 1958 году в 10 км от места впадения реки Кокпекты в реку Солонка. Река Кокпекты образуется слиянием двух притоков: река Борлысай, правый, и река Кокбулак, левый. Длина реки Кокпекты – 14,5 км.

Площадь бассейна реки Кокпекты до плотины – 166,4 км². Водоохранилище было подперто грунтовой плотиной длиной 700 м, шириной по гребню 6 м, с заложением откосов 1:3.

Переливы через тело плотины возникли в 18:05 30.03.2014 года. Размыв начался в 01:30 31.03.2014 года и к 02:15 основной проран был сформирован полностью.

Условные обозначения³

H_{max} , H_i – максимальная глубина (для водохранилищ – высота дамбы) и глубина на i -ом шаге итерации слоя жидкости, вытекающего из водохранилища, м;

ΔH_i – понижение уровня жидкости в водохранилище, м;

y_0 , y_i , Δy – начальная, на i -ом шаге итерации и приращение глубины прорана, м;

b_0 , b_i – начальная и на i -ом шаге итерации ширина прорана, м;

l_i – длина прорана на i -ом шаге итерации, м

h_0 , h_i , Δh_i – начальная, на i -ом шаге итерации и приращение глубины потока, м;

V_{0i} , V_i , ΔV_i – неразмывающая, на i -ом шаге итерации и приращение скорости потока в проране, м/с;

$V_{кри}$ – критическая скорость потока на i -ом шаге итерации, м/с;

Q_i – расход воды в створе прорана на i -ом шаге итерации, м³/с;

R_i – гидравлический радиус на i -ом шаге итерации, м;

¹ РД 03-607-03 Методические рекомендации по расчёту развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходах. М.: НТЦ Промышленная безопасность, 2003. 27 с.

² РД 09-391-00 Методика расчёта зон затопления при гидродинамических авариях на хранилищах производственных отходов химических предприятий М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. 68 с.

³ Условные обозначения приводятся в полном соответствии с РД 03-607-03 и РД 09-391-00 и иллюстрируются рисунком 1, заимствованным из рассматриваемых руководящих документов

Δt_i – время размыва элементарного объёма, с;
 F – площадь водохранилища по максимальной отметке гребня дамбы, м²;
 m – коэффициент водослива, б/р, в РД 03-607-03 и РД 09-391-00 принят равным 0,31;
 g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с²;
 ρ_s – плотность частиц грунта тела дамбы, т/м³;
 ρ_d – средняя плотность сухого грунта тела дамбы, т/м³;

$\rho_{жс}$ – плотность жидкости, т/м³;
 ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, см²/с;
 μ_i – транспортирующая (размывающая) способность потока, б/р;
 $W_0, \Delta W_i$ – начальный и приращение объёма прорана на i -ом шаге итерации, м³;
 d – средневзвешенный размер частиц грунта, мм.

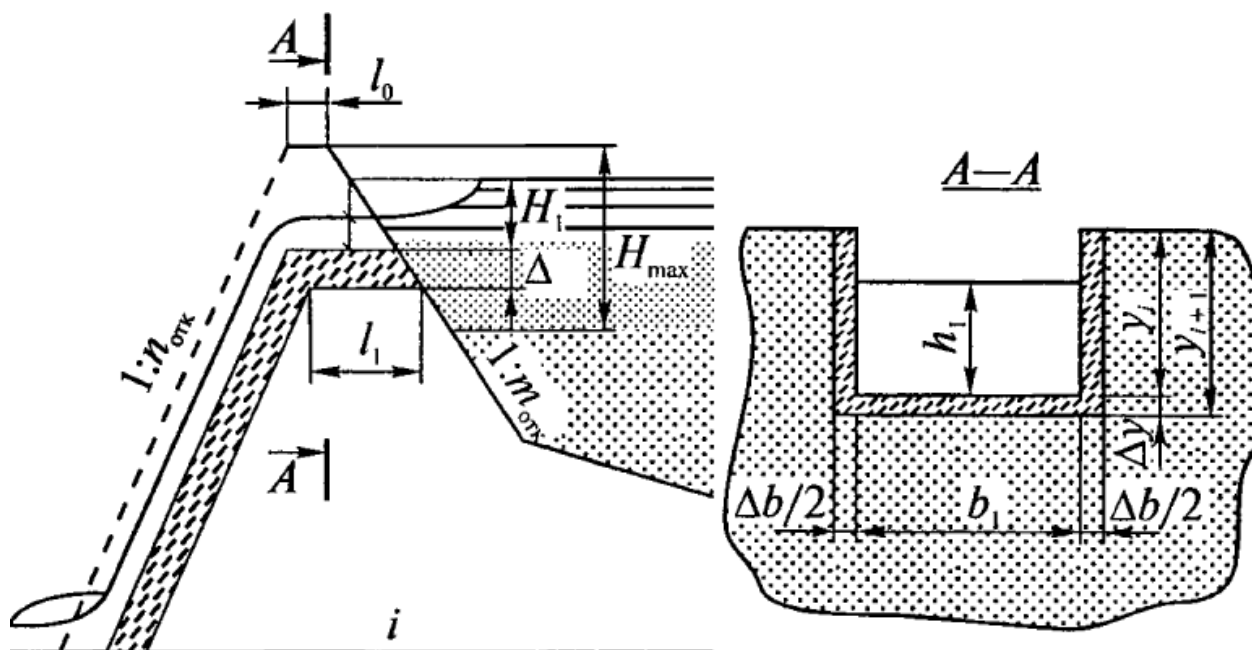


Рисунок 1. Схема расчёта размыва прорана
 Figure 1. Scheme for erosion calculating

Результаты и обсуждение

Вначале общие соображения. В России действует ГОСТ 8.417-2002⁴, в пункте 4.1 которого сказано: «Подлежат обязательному применению единицы Международной системы единиц». Рассматриваемые руководящие документы в нарушение ГОСТ 8.417-2002 не только используют не стандартизированные величины размерностей (что видно из раздела Условные обозначения), но даже в некоторых формулах в качестве сомножителей соседствуют метры, сантиметры и миллиметры (что будет показано далее по тексту статьи)

Согласно пунктам 1.3 РД 03-607-03 и 1.4 РД 09-391-00, рассматриваемые руководящие

документы позволяют определить следующие показатели, характеризующие аварию:

- время образования прорана;
- размеры прорана;
- форму развития прорана (РД 03-607-03);
- расходы и объёмы выливающейся жидкости по мере развития прорана.

Кроме того, на промежуточном этапе рассчитываются скорость и глубина прорывной волны, что соответствует требованиям [Тарабаев и др., 2000].

За начальные условия расчёта размыва элементарного прорана принимается равенство:

$$y_0 = b_0 = h_0 = 0,5 \text{ (РД 03-607-03), м}$$

$$y_0 = b_0 = h_0 = 0,1 \cdot H_{max} \text{ (РД 09-391-00), м}$$

⁴ ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. М.: Стандартинформ, 2018. 33 с.

Анализ начальных условий показывает, что авторы рассматриваемых руководящих документов априори пренебрегают временем, за которое образовалась эрозионная рытвина с соответствующими размерами.

На основании наших наблюдений можно сделать вывод, что при переливе воды через гребень дамбы время, затраченное на размыв эрозионных рытвин с глубиной 0,5 м (и более – при расчётах по методике РД 09-391-00), сравнимо со временем дальнейшего развития прорана. Это связано со сравнительно малыми скоростями потока на начальном этапе размыва и наличием множественных очагов перелива.

Поэтому на основании рассматриваемых руководящих документов оценивать время образования прорана нельзя. Ошибка априори может многократно превышать расчётное время развития прорана. В рассматриваемом примере (Кокпектинская катастрофа) время на

образование эрозионных рытвин составило 440 минут, на размыв самого прорана – около 45 минут.

В начальных условиях РД 03-607-03 и РД 09-391-00 форма и размеры прорана в сечении задаются в виде квадрата со стороной 0,5 м или $0,1 \cdot H_{max}$, соответственно.

Большинство эрозионных рытвин по уплотнённому грунту, которые наблюдаются в природе, в сечении имеют трапецеидальную форму с глубиной в разы меньшей, чем ширина (рисунок 2). В рассматриваемом примере (Кокпектинская катастрофа) глубина рытвины составляла 0,6 м, ширина – 2,3 м. Исключение составляют рытвины на свежесыпанных склонах, где наблюдается обратная зависимость (рисунок 3). Следовательно первичные размеры и форма прорана авторами рассматриваемых руководящих документов заданы некорректно.



Рисунок 2. Размыв низового откоса грунтовой плотины р. Кокпекты. Фото А.Ю. Виноградова
Figure 2. Erosion of the lower slope of the ground dam on Kokpekty river. Photo by Alexey Yu. Vinogradov



Рисунок 3. Эрозионные рытвины на незадернованной неуплотненной дамбе. Фото А.В. Шалаева

Figure 3. Erosion tracks on an unturfed unpressed dam. Photo by Anatoly V. Shalaeв

Приращение глубины прорана в рассматриваемых руководящих документах на каждом расчётном шаге задаётся постоянным и равно

$$\Delta y \leq y_0$$

Приращение ширины прорана при этом равно:

$$\Delta b = \Delta y \frac{b_0}{y_0 + \Delta y} \quad (\text{РД 03-607-03}) \quad (1a)$$

$$\Delta b = \Delta y \frac{y_0}{y_0 + \Delta y} \quad (\text{РД 09-391-00}) \quad (1б).$$

При достижении $y_i = H_{max}$ увеличение сечения прорана достигается за счёт изменения ширины:

$$b_i = b_{i-1} + 2,5\Delta y \frac{y_0}{y_0 + \Delta y},$$

проран при этом приобретает прямоугольную форму.

На самом деле даже при размыве грунтовой плотины обычным водным потоком, вертикальный размыв не останавливается при достижении низом прорана отметки дна

водохранилища/реки, а продолжается на некоторую глубину, зависящую от оставшегося объёма воды в водохранилище.

В рассматриваемом примере (Кокпектинская катастрофа) проран имеет окончательную форму в виде трапеции с шириной по основанию 38 м, по верху – 59 м.

Теперь рассмотрим расчёт расходов воды и объёма жидкости, выливающейся по мере развития прорана.

Расход воды в створе прорана по рассматриваемым руководящим документам рассчитывается по формуле, которая используется для различных типов водосливов [Чугаев, 1982]:

$$Q_i = m b_i H_i^{3/2} \sqrt{2g}$$

Численное значение коэффициента m определяет следующие параметры прорана: прямоугольный водослив с широким порогом с не скруглённым входным горизонтальным ребром и боковым сжатием $\varepsilon = 0,95$. Глубина потока на пороге водослива определена по способу Беланже [Виноградова и др., 2019].

Скорость потока в проране на *i*-ом шаге

$$V_i = m\sqrt{2gH_i}.$$

Расчёт неразмывающих скоростей мелкозернистых грунтов ($0,05 < d < 0,25$ мм – РД 03-607-03) и ($0,1 < d < 0,25$ мм – РД 09-391-00) производится по эмпирической зависимости В.С. Кнороза для несвязных грунтов:

$$V_{0i} = 0,71 \frac{v^{0,3} (g\rho_{жс})^{0,35} d^{0,05}}{\sqrt{0,0008 + 0,006R_i^{-0,25}}} \quad (2)$$

Для грунтов с $d < 0,1$ мм (РД 09-391-00) значение V_0 рекомендуется определять по нормативно-справочной литературе с учётом силы сцепления между частицами грунта. В случае РД 03-607-03 имеет место пробел для грунтов с размерами частиц $0,05 < d < 0,1$ мм.

Однако, силы сцепления становятся значимы уже с $d < 0,25$ мм, что показано например в СО 34.21.204-2005⁵. Большинство грунтовых плотин строится из суглинков с крупностью частиц 0,1 мм и меньше.

Тело Кокпектинской плотины сложено суглинками со средним размером частиц 0,05 мм, отдельностей – 4 мм. Плотность грунта ρ_d тела дамбы принята равной 1 750 кг/м³.

В результате расчётов по рекомендуемым в рассматриваемых руководящих документах формулам для величин с размерностями, приведёнными в разделе Условные обозначения, неразмывающие средние скорости превышают 4 м/с, что однозначно неверно.

Однако если принять значение кинематического коэффициента вязкости воды в м²/с в соответствии с ГОСТ 8.417-2002, а не в

см²/с (как предписано в рассматриваемых руководящих документах), то значения неразмывающих средних скоростей составит 0,35 м/с и выше, что согласуется с данными [Кадацкая и др., 2019] и с таблицей 7 СО 34.21.204-2005.

Транспортирующая (размывающая) способность потока в рассматриваемых руководящих документах определяется по отличающимся коэффициентом формулам:

$$\mu_i = 0,01 \left(\frac{V_{кpi} - V_{0i}}{3W_0} \right)^4 \left(\frac{d}{R_i} \right)^{1,6} \text{ РД 03-607-03} \quad (3a)$$

$$\mu_i = \left(\frac{V_{кpi} - V_{0i}}{3W_0} \right)^4 \left(\frac{d}{R_i} \right)^{1,6} \text{ РД 09-391-00} \quad (3б)$$

где R_i – гидравлический радиус, м.

Анализ размерности зависимостей (3a), (3б)

$\left[\left(\frac{м/с - м/с}{м/с} \right) \left(\frac{мм}{м} \right) \right]$ говорит о том, что транспортирующая способность потока в рассматриваемых руководящих документах безразмерна (что и указано в разделе условные обозначения). Но транспортирующая способность потока имеет соответствующий физический смысл и размерность: кг/с [Шмакова, Кондратьев, 2019] или м³/с [Гришанин, 1969].

В таблице 1 представлены значения транспортирующей (размывающей) способности, рассчитанные по зависимостям (3a), (3б); средняя неразмывающая скорость $V_{0i} = 0,79$ м/с, при подстановке d в различных размерностях – метры (в соответствии с ГОСТ 8.417-2002) или миллиметры (как предписано в рассматриваемых руководящих документах).

Таблица 1 Значения транспортирующей (размывающей) способности μ_i , б/р

Table 1. The value of transporting (erosion) flow ability μ_i , dimensionless

$V_{кpi}$, м/с		1,5	2	2,5	3	4	5
R_i , м		0,14	0,24	0,33	0,42	0,70	1,06
$d=0,004$ м	(3б)	0,004	0,037	0,148	0,412	1,83	5,42
	(3a)	$4 \cdot 10^{-5}$	$0,37 \cdot 10^{-5}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$4,12 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$5,42 \cdot 10^{-2}$
$d=4$ мм	(3б)	276	1017	9313	25985	116000	342200
	(3a)	2,76	10,2	93,1	260	1160	3422

⁵ СО 34.21.204-2005 Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. СПб.: ОАО ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 2006. 104 с.

Полученные минимальные значения при использовании $d=4$ мм (при принятой как в пункте 2.2.1 размерности средневзвешенного размера частиц грунта РД 09-391-00) отличаются от приведённого в пункте 2.2.3 документа на 5 порядков, а от приведённого в РД 03-607-03 на 3 порядка. При использовании $d=0,004$ м адекватные численные значения имеют место только при использовании РД 09-391-00.

Следовательно, принятая в пунктах 2.2.1 РД 09-391-00 и 3.1 РД 03-607-03 размерность средневзвешенной величины частиц грунта в мм, в данной конкретной формуле, в отличие от других, должна приниматься в м. Подобные нестыковки в документах подобного уровня недопустимы.

Исходя из нашей экспертной оценки, мутность при размыве грунтовых плотин в зависимости от скорости потока колеблется в пределах 10-250 кг/м³. Значения

соответствующей транспортирующей способности, в зависимости от расхода воды через проран, представлены в таблице 2.

Используемую в рассматриваемых руководящих документах формулу транспортирующей способности предложил В.С. Кнороз [Гришанин, 1969] и в первоисточнике выглядит она следующим образом:

$$\mu_i = k \left(\frac{V_{kpi} - V_{0i}}{W_0} \right)^4 \left(\frac{d}{R_i} \right)^{1,6} Q \quad (4)$$

Эта зависимость имеет размерность м³/с и принципиально отличается от (3б) на множитель Q (расход воды) и коэффициент $(1/3)^4$. Примерно на величину этого коэффициента (0,012) отличается соответствующая формула в РД 03-607-03 от РД 09-391-00.

Таблица 2. Транспортирующая способность потока при размыве грунтовых плотин в зависимости от скорости

Table 2. The transporting flow ability during ground dam erosion depending on the velocity

V_{kpi} , м/с	1,5	2	2,5	3	4	5
R_i , м	0,14	0,24	0,33	0,42	0,70	1,06
Q_i , м ³ /с	0,25	1,0	2,5	4,8	18,0	53,1
μ_i , кг/с	2	10	98	324	2880	16600
μ_i , м ³ /с (4)	0,001	0,014	0,08	0,3	2,2	9,8

Коэффициент k у В.С. Кнороза (формула (4)) для мелкозернистого и пылеватого песка принят 0,00026 [Гришанин, 1969]. В рассматриваемом примере (Кокпектинская катастрофа) расчёт с использованием такого численного значения коэффициента k занижает транспортирующую способность потока на порядок. Пример расчёта для данной аварии приведён в конце статьи (таблица 6).

Следующий проблемный пункт в рассматриваемых руководящих документах – расчёт гидравлической крупности.

Гидравлическая крупность W_0 частиц размером 0,05 мм при температуре воды 10°C согласно табличным данным Р 52.24.627-2007⁶ (приложение Г) и СТО ГУ ГГИ 08.29-2009⁷ при ламинарном режиме течения жидкости составит 0,002 м/с, при турбулентном колеблется между 0,031 [Ананенков и др., 2003] и 0,233 м/с (таблица 9.16 СТО ГУ ГГИ 08.29-2009) (экстраполированные значения). При размыве дамбы, несомненно, имеет место турбулентный режим.

⁶ Р 52.24.627-2007 Рекомендации. Усовершенствованные методы прогностических расчётов распространения по речной сети зон высокозагрязнённых вод с учётом форм миграции наиболее опасных загрязняющих веществ. Р. н/Д.: Росгидромет, ГУ ГХИ, 2007. 172 с.

⁷ СТО ГУ ГГИ 08.29-2009 Учёт руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки. СПб.: Издательство Нестор-История, 2009. 184 с.

При принятом среднем размере отдельностей 4 мм, гидравлическая крупность отрывающихся отдельностей связного грунта согласно данным таблицы А.3 СП 32-102-95⁸ для Кокпектинской плотины составляет 0,22 м/с.

Величину гидравлической крупности, W_0 м/с, для размываемых грунтов в проране при диаметре частиц грунта $d \leq 0,1$ мм рекомендуется определять по формуле:

$$W_0 = \frac{gd^2 \rho_{ж}}{18\nu} \quad (\text{РД 03-607-03}) \quad (5)$$

$$W_0 = \frac{gd^2}{18\nu} \left(\frac{\rho_S}{\rho_{ж}} - 1 \right) \quad (\text{РД 09-391-00}) \quad (6)$$

Численное различие в формулах (5) и (6), при прочих «вольностях», невелико:

$$\left(\frac{\rho_S}{\rho_{ж}} - 1 \right) = 1,65 \text{ (б/р)} \quad (\rho_{ж} = 1 \text{ т/м}^3)$$

Приведём размерности для формулы из РД 03-607-03:

$$\left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right] = \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \frac{\text{мм}^2 \cdot \text{с}}{\text{см}^2} \frac{\text{т}}{\text{м}^3} \right] = 0,01 \left[\frac{\text{т}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \right]$$

На основании этого можно сделать вывод, что формула гидравлической крупности РД 03-607-03 не имеет физического смысла, никаких размерностных коэффициентов в ней нет.

Рекомендованная формула основана на законе Стокса, приведённом например в [Александров, Зубарев, Исакова, 2012; Чижиумов, 2007]. Но в первоисточниках в формуле присутствует динамическая, а не кинематическая вязкость. Авторы рассматриваемых руководящих документов обошли эту ошибку, подставив в формулу значение кинематической вязкости в $\text{см}^2/\text{с}$. Поскольку, как мы уже отмечали, во всех формулах отсутствует строгость в использовании размерностей, данная вольность осталась незамеченной. Однако, если вместо кинематической вязкости в формулу ввести динамическую, то все становится на свои места и

наконец-то гидравлическая крупность приобретает правильную размерность – м/с!

Перейдём к разбору формулы из РД 09-391-00.

На падающую частицу действуют три силы: сила тяжести, направленная вниз: $F_{\text{тяж}} = mg$

сила Архимеда: $F_{\text{арх}} = W\rho_{ж}g$,

где $W = \frac{4}{3}\pi r^3$ – объём частицы;

сила вязкого трения $F_{\text{тр}}$, направленная вверх, навстречу скорости. Расчёт внутреннего трения для движения частицы грунта в вязкой среде при ламинарном режиме (который всегда отсутствует при прорыве дамб и плотин), описывается формулой Стокса:

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta \cdot rW_0$$

где r – радиус частицы,

W_0 – скорость её движения (здесь: гидравлическая крупность),

η – коэффициент динамической вязкости жидкости.

Уравнение движения для падающей частицы в проекциях на вертикальную ось

$$F_{\text{тяж}} - F_{\text{арх}} - F_{\text{тр}} = ma$$

как бы приводит к зависимости (6), но с существенным различием: вместо динамической вязкости авторы рассматриваемых руководящих документов подставляют вязкость кинематическую

$$W_0 = \frac{gd^2}{18\eta} \left(\frac{\rho_d}{\rho_{ж}} - 1 \right)$$

Для воды кинематический коэффициент вязкости вне зависимости от температуры в рассматриваемых руководящих документах принят равным $0,0101 \text{ см}^2/\text{с}$. Однако, согласно например [Большаков, Константинов, Попов, 1977], кинематический коэффициент вязкости воды меняется от $0,00000179 \text{ м}^2/\text{с}$ при 0°C до $0,00000106 \text{ м}^2/\text{с}$ при 20°C .

Динамический коэффициент вязкости при этом меняется от $0,00179 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ при 0°C до $0,00106 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ при 20°C .

⁸ СП 32-102-95 Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчёта местных размывов. М.: Центр Трансстройиздат, 1996. 79 с.

Как нам представляется, правильное использовать ρ_d , а не ρ_s , поскольку мы говорим об отдельностях, а не о частицах!

В результате расчёта по полученной зависимости, гидравлическая крупность для конкретной ситуации (Кокпектинская плотина) при температуре 5°C составляет 0,004 м/с.

Единственная возможность получить «правильный» ответ – подставить следующие значения: диаметр частиц (а не отдельностей!) $d=0,05$ мм и $\nu = 0,0101$ см²/с.

Результат – 0,22 м/с, что согласуется с таблицей 9.16 СТО ГУ ГГИ 08.29-2009 и даёт адекватные значения μ_i (таблица 1)!

Если принять значение гидравлической крупности частиц для ламинарного режима равной 0,0015 м/с (табл. Г1 Р52.24.627-2007 с пересчётом на $t=5^\circ\text{C}$), то величина транспортирующей способности составит $15,5 \cdot 10^6$. А если подставить диаметр отдельностей (даже в метрах) 0,004 м – то гидравлическая крупность составит 10 м/с, а транспортирующая способность – 10^{-8} .

На основании этого разбора можно сделать вывод, что даже такая простая задача, как расчёт гидравлической крупности и связанной с ней транспортирующей способности (в неизвестных размерностях) по методике, прописанной в рассматриваемых руководящих документах, представляет собой нерешаемый ребус.

Время размыва элементарного объёма прорана в рассматриваемых руководящих документах предлагается вычислять по формуле:

$$\Delta t_i = \frac{2\rho_d \Delta W_i}{\mu_i Q_i} \quad (7)$$

где ΔW_i – увеличение объёма прорана, за время Δt_i , м³.

Размерность зависимости (7): $[c] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}}{\text{м}^3 \cdot \text{м}^2} \right]$.

Вывод – зависимость (7) физического смысла не имеет. Даже в случае, если принимаем μ_i в кг/с, то размерность Δt_i составляет с²/м³.

Понижение уровня воды в водохранилище в рассматриваемых руководящих документах предлагается рассчитывать по формуле:

$$\Delta H_i = \frac{\Delta V_i}{F}$$

где ΔV_i – объём жидкости, вытекающей из водохранилища за время Δt_i : $\Delta V_i = \frac{2\rho_d \Delta W_i}{\mu_i}$,

ΔW_i – увеличение объёма размываемого прорана, м³:

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

Например, при высоте дамбы 10 м, длина и глубина прорана на 20-ом шаге становятся постоянными, объём увеличивается только за счёт приращения ширины: при принятом увеличении глубины $y_0=0,5$ м (РД 03-607-03) приращение ширины составит $\Delta b = 0,625$ м, следовательно, на шаге $i=20+1$ приращение объёма будет постоянным и равным $0,313$ м³.

Объём проходящей через проран воды, ΔV_i , на каждом расчётном шаге зависит только от транспортирующей способности в предположении, что её значения могут меняться от 0,003 (пункт 2.2.3 РД 09-391-00) до 30 (таблица 3).

Глубина слоя воды, вытекающего из водохранилища:

$$H_i = H_{i-1} + \Delta y - \Delta H_{i-1}$$

Поскольку приращение Δy фиксированное, а понижение уровня на шаге может быть очень небольшим (реальные площади водохранилищ составляют сотни тысяч квадратных метров), то глубина слоя воды будет расти в арифметической прогрессии и в рассматриваемом примере при $\Delta y = 0,5$ м превысит H_{\max} уже на 21 шаге, а в случае расчёта по РД 09-391-00 (при принятом $\Delta y = 0,1 \cdot H_{\max}$) – уже на 11 шаге.

При дальнейших итерациях расчётная глубина потока может многократно превысить H_{\max} , что абсурдно.

Таблица 3. Падение уровня воды или жидких отходов в водохранилище ΔH_i , м, при площади зеркала $F=1\ 000\ \text{м}^2$ на каждом расчётном шаге

Table 3. The water level decline in the reservoir, m, from area $F=1\ 000\ \text{м}^2$ at each calculated step

μ		0,003	0,03	0,3	3	30
$\Delta y = 0,5\ \text{м}$	$\Delta V_i, \text{м}^3$	365,17	36,517	3,652	0,3652	0,0365
	$\Delta H_i, \text{м}$	0,3652	0,0365	0,0036	0,00036	0,00004
$\Delta y = 0,01\ \text{м}$	$\Delta V_i, \text{м}^3$	67,88	6,787	0,679	0,0679	0,0068
	$\Delta H_i, \text{м}$	0,0678	0,0068	0,0007	0,00007	0,00007

Таблица 4. Сравнение рассчитанных и оценочных характеристик прорана и волны прорыва при Кокпектинской катастрофе

Table 4. Compare of the calculated and estimated characteristics of the erosion track and the breakthrough wave under the Кокпекты catastrophe

характеристики		$b, \text{м}$	$W, \text{м}^{3*}$	$t, \text{мин}$	Q_{max}	V_{max}	μ_{max}	$\mu_{\text{ср}}, \text{м}^3/\text{с}$
экспертная оценка		59	21240	440+45	1000 ± 200	5,5	-	7,8
расчётные	$\Delta y = 0,5\ \text{м}$	94,6	34 050 / 3 300	124	1570	6,5	0,34	1,1
	$\Delta y = 0,01\ \text{м}$	115,4	41 550 / 4 200	75	1860	6,5	0,25	1,6

Примечание: * – в знаменателе приведён суммарный объём прорана, полученный на основании расчёта размывающей способности $\mu_{\text{ср}}$ по зависимости В.С. Кнороза [Гришанин, 1969].

Решением проблемы, на наш взгляд, может быть добавление условия, что приращение глубины Δy имеет место только до достижения $H_i = H_{i-1} + \Delta y - \Delta H_{i-1} < H_{\text{max}}$. Тогда далее расчёт ведётся по формуле $H_i = H_{i-1} - \Delta H_i$, численные значения глубины слоя воды, вытекающего из водохранилища, приобретают физический смысл.

К сожалению, приемлемое решение в рассматриваемых руководящих документах не представлено, что обуславливает невозможность их практического использования.

Выводы

1. Рассмотренные руководящие документы, в нарушение ГОСТ 8.417-2002 «Государственная система обеспечения единства измерений», используют нестандартизированные величины размерностей. Размерности параметров, приведённые в условных обозначениях руководящих документов, часто не соответствуют таковым в формулах.
2. В рассмотренных руководящих документах не учитывается время на образование эрозионных рытвин, что приводит к ошибке оценки времени

образования прорана на конкретном примере (Кокпектинская катастрофа) на порядок.

3. В рассмотренных руководящих документах принята прямоугольная форма прорана, которая на практике в подавляющем большинстве случаев представляет собой трапецию. В рассматриваемом примере (Кокпектинская катастрофа) ширина прорана по основанию составляла 38 м, по верху – 59 м.

4. Расчётные размеры прорана превышают измеренные в два раза. В зависимости от выбранного шага различие в расчётных его размерах может достигать 25%.

5. Величину неразмывающей скорости V_0 рекомендуется определять (РД 09-391-00) с учётом силы сцепления между частицами грунта. В случае РД 03-607-03 не учитываются силы сцепления для грунтов с размерами частиц $0,05 < d < 0,1$ мм. Значение кинематического коэффициента вязкости воды при расчёте V_0 необходимо подставлять в $\text{м}^2/\text{с}$, а не в $\text{см}^2/\text{с}$.

6. Гидравлическую крупность W_0 , м/с, для размываемых грунтов (при диаметре частиц грунта $d < 0,1\ \text{мм}$) в проране рекомендуется определять из РД 09-391-00. В РД 03-607-03 для расчёта W_0 уже используется другая зависимость,

численное различие в формулах составляет 1,65 раза. Кроме того, в используемой формуле вместо динамической рекомендуется использовать кинематическую вязкость.

7. Транспортирующая (размывающая) способность потока в рассматриваемых руководящих документах безразмерна и не имеет физического смысла, поэтому не представляется возможность оценить адекватность полученных значений. Транспортирующая способность потока, полученная по зависимости В.С. Кнороза, используемой как первоисточник для формул

30 (РД 09-391-00) и 23 (РД 03-607-03) занижает величину размыва почти на порядок.

8. Расходы и объёмы воды, изливающейся из прорана грунтовой плотины, оцениваются методикой адекватно.

В целом численные значения большинства параметров, рассчитанных по рассматриваемым методикам, не соответствуют действительности и/или не имеют физического смысла, их нельзя использовать на практике, а сами методики нуждаются в незамедлительном пересмотре.

Литература

Александров Д.В., Зубарев А.Ю., Исакова Л.Ю. Введение в гидродинамику: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2012. 112 с.

Ананенков А.Г., Ставкин Г.П., Андреев О.П., Хабибуллин И.Л., Лобастова С.А. Эколого-экономическое управление охраной окружающей среды. М.: Недра, 2003. 227 с.

Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.Н. Справочник по гидравлике. К.: Вища школа, 1977. 280 с.

Виноградова Т.А., Макушин М.А., Виноградов И.А., Парфенов Е.А., Кадацкая М.М., Сазонова С.И. Расчёт морфометрических характеристик прорана и максимальных расходов при прорывах грунтовых плотин // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Том 1. Вып. 2. С. 280-295. DOI: [10.34753/HS.2019.1.2.006](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.2.006).

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 428 с.

Кадацкая М.М., Виноградов А.Ю., Кацадзе В.А., Бельский Ю.И., Бачериков И.В., Хвалев С.В., Каляшов В.А. Анализ методов расчёта 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).

References

Aleksandrov D.V., Zubarev A.Yu., Iskakova L.Yu. *Vvedenie v gidrodinamiku: uchebnoe posobie [Introduction to fluid dynamics: a tutorial]*. Ekaterinburg, Publ. of the Ural University, 2012. 112 p. (In Russian).

Ananenkov A.G., Stavkin G.P., Andreev O.P., Khabibullin I.L., Lobastova S.A. *Ekologo-ekonomicheskoe upravlenie okhranoi okruzhayushchei sredy [Ecological and economical control over environment protection]*. Moscow, Publ. Nedra, 2003. 227 p. (In Russian).

Bol'shakov V.A., Konstantinov Yu.M., Popov V.N. *Spravochnik po gidravlike [Handbook of hydraulics]*. Kiev, Publ. Vishcha shkola, 1977. 280 p. (In Russian).

Chizhiumov S. D. *Osnovy gidrodinamiki: uchebnoe posobie [Fundamentals of hydrodynamics: a tutorial]*. Komsomolsk-on-Amur, Publ. of GOUVPO "KnAGTU", 2007. 106 p. (In Russian).

Chugaev R.R. *Gidravlika: uchebnik dlya vuzov [Hydraulics: a textbook for high schools]*. Leningrad, Publ. Energoizdat, 1982. 672 p. (In Russian).

Grishanin K.V. *Dinamika ruslovykh potokov [The dynamics of channel flows]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 428 p. (In Russian).

Kadatskaya M.M., Vinogradov A.Yu., Katsadze V.A., Belenkiy Yu.I., Bacherikov I.V., Grigor'ev G.V., Hvalev S.V. *Analiz metodov rascheta nerazmyvayushchei skorosti pri proektirovanii vodopropusknykh i vodootvodnykh sooruzhenii lesnogo khozyaistva [Analysis of*

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

Тарабаев Ю.Н., Зотов Ю.М., Чагаев В.П. Шульгин В.Н. Инженерное обеспечение предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций при наводнениях (учебное пособие). Новогорск: Академия гражданской защиты МЧС России, 2000. 207 с.

Чижиумов С.Д. Основы гидродинамики: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. 106 с.

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

Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Транспортирующая способность речного потока// Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. № 56. С. 176-187 DOI: [10.33933/2074-2762-2019-56-176-187](https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-56-176-187).

methods for calculating non-blurring speed in the design of culverts and drainage facilities of forestry]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii [Bulletin of the St. Petersburg Forestry Academy]*, 2019, iss. 227, pp. 174-187. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.21266/2079-4304.2019.227.174-187](https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.227.174-187).

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 Engineering]*, 2011, no. 3, pp. 77-82. (In Russian; abstract in English).

Shmakova M.V., Kondratyev S.A. Transportiruyushchaya sposobnost' rechnogo potoka [Transporting capacity of river flow]. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta [Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2019, iss. 56, pp. 176-187. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.33933/2074-2762-2019-56-176-187](https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-56-176-187).

Tarabaev Yu.N., Zotov Yu.M., Chagaev V.P. Shul'gin V.N. *Inzhenernoe obespechenie preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychainykh situatsii pri navodneniyakh (uchebnoe posobie) [Engineering support for prevention and elimination of emergency situations during floods (textbook)]*. Novogorsk, Publ. of Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia, 2000. 207 p. (In Russian).

Vinogradova T.A., Makushin M.A., Vinogradov I.A., Parfenov E.A., Kadatskaya M.M., Sazonova S.I. Raschet morfometricheskikh kharakteristik prorana i maksimal'nykh raskhodov pri proryvakh gruntovykh plotin [Calculation of the morphometric characteristics of the closure channel and the extreme discharge during break-throughs of ground dams]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2019, vol. 1, iss. 2, pp. 280-295. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.34753/HS.2019.1.2.006](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.2.006).