

ISSN 0368-0738

ИЗВЕСТИЯ

ВНИИГ им. Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

Том

257

Санкт-Петербург
2010

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЫВАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОТОКА НА МОНОЛИТНЫЕ ОБРАЗЦЫ СКАЛЬНЫХ И ПОЛУСКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ

Ги Берто¹, А.Б. Векслер², В.М. Доненберг³, А.В. Лаломов⁴

Оценка размываемости консолидированных грунтов является важной практической задачей при проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений. Она представляет также существенный интерес в области седиментологии для реконструкции гидродинамических обстановок палеобассейнов.

Анализ существующих методов оценки начала размыва консолидированных грунтов движущимся по его поверхности водным потоком показывает, что имеющиеся разработки дают достаточно полное представление об условиях, при которых начинается размыв несвязных (песчаных, гравийно-галечниковых) и связных (глина, супесь, суглинок) консолидированных грунтов под воздействием потока, скорости которого не превосходят 2,5 – 3,5 м/с [1 – 3].

Данные о взаимодействии потока со скальными и полускальными грунтами ограничены теоретическим рассмотрением влияния размеров породных блоков и системы расположения трещин, пересекающих скальный массив, на значение скорости, при которой начинается размыв русла [4]. Экспериментальное подтверждение полученных результатов представлено отрывочными данными случайных натурных наблюдений, носящих весьма приближенный характер, поскольку неизвестно, при каких именно гидравлических условиях, то есть при каких скоростях и глубинах потока происходил размыв [5-7], а расчетные рекомендации [1] носят условный характер и ориентированы на среднестатистический размер породных блоков скальных грунтов. Также нет возможности судить о том, при каких условиях происходили разрушения скального русла и образование воронки размыва в нижних бьефах водосбросных сооружений высоконапорных плотин, поскольку исследователю известен только конечный результат – очертания и глубина воронки после того, как воздействие потока уже прекратилось [8,9]. Кроме того, специфические условия размыва русла па-

¹ Почетный член междунар. ассоц. седиментологов

Тел.: 33-1-309-98-384, E-mail: berthault.guy@orange.fr
78250, France, 28 Boulevard Thiers, Meulan

² Ведущий научн. сотр.

Тел.: (812) 535-29-47, E-mail: aveksler@hydro.vniig.ru

³ Старший научн. сотр.

Тел.: (812) 535-88-71, E-mail: donenberg@hydro.vniig.ru

ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева», 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21

⁴ Старший научн. сотр., канд. геол.-мин. наук

Тел.: (499) 230-84-27, E-mail: lalomov@mail.ru

ИГЕМ РАН

119017, Москва, Старомонетный пер., 35

дающей струей существенно отличаются от условий размыва грунта водной массой, перемещающейся по его поверхности.

Авторами настоящей статьи предпринята попытка экспериментального определения размываемости некоторых видов полускальных и скальных пород под воздействием высокоскоростного потока, перемещающегося по их поверхности.

Исследования выполнялись на замкнутой циркуляционной напорной гидравлической установке, в которой был организован рабочий участок с прямоугольным поперечным сечением $29 \times 5 \text{ см}^2$, в пределах которого могла быть получена средняя скорость течения до 27 м/с .

Установка представляет собой замкнутую гидравлическую систему (рис.1), включающую насосный агрегат 1 мощностью 200 кВт (1Д1250-636), напорный трубопровод с регулирующей задвижкой 2, снабженной электроприводом, подводящий трубопровод 3, передний переходный участок 4 (конфузор), рабочий участок 5, задний переходный участок 6 (диффузор), отводящий трубопровод 7, трубопровод слива воды из системы 8, подвод воды для заполнения системы 9, датчик измерения и контроля расхода воды 10.

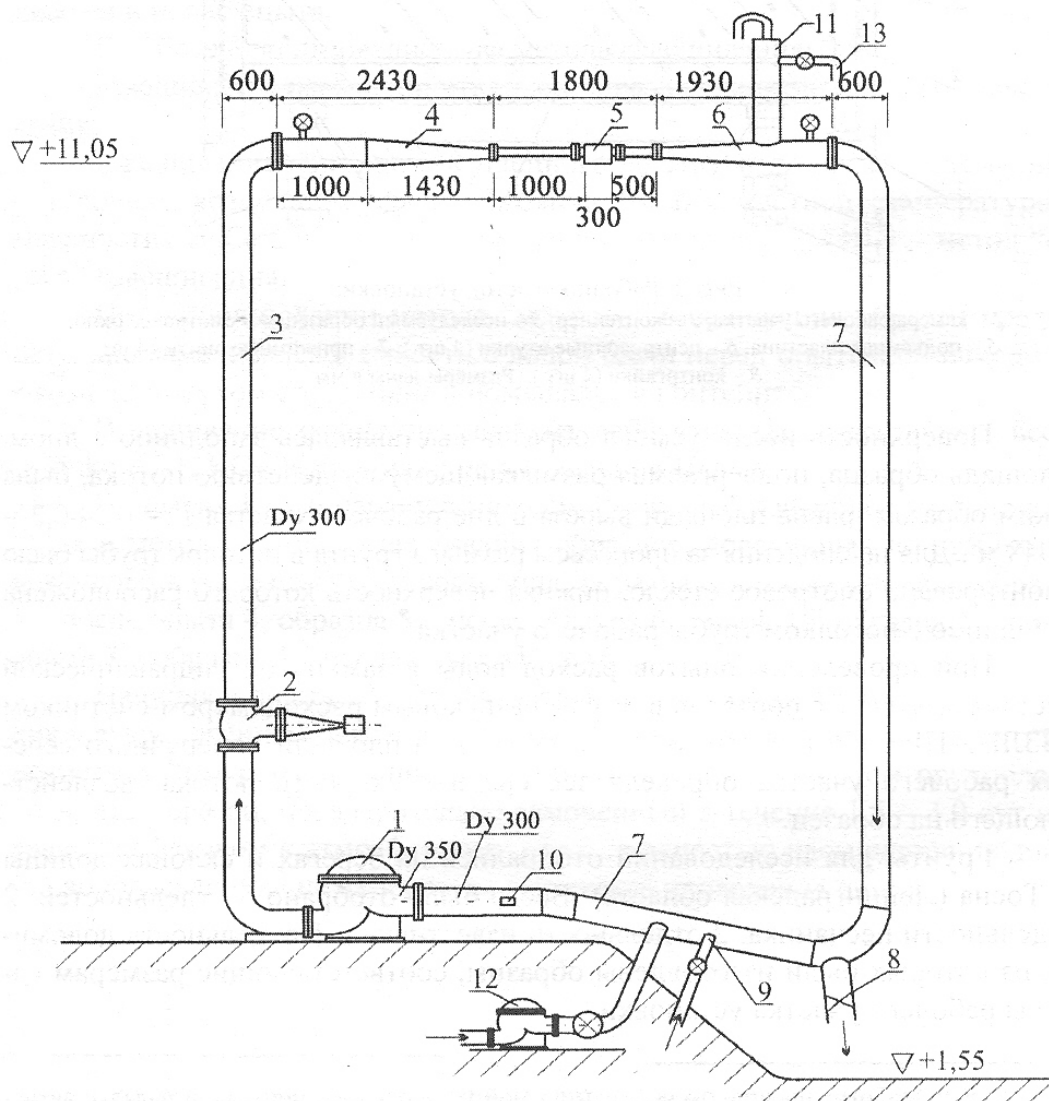


Рис. 1. Схема установки для исследования интенсивности размыва грунтов
Горизонтальные размеры даны в миллиметрах; вертикальные (отметки) – в метрах

Для снятия вакуума на диффузорном переходном участке 6 установлено компенсационное устройство 11, стояк которого используется также для слива 13 воды, дополнительно закачиваемой в установку насосом 12 с целью охлаждения циркулирующего в ней потока.

Рабочий участок 5 представляет собой трубу прямоугольного сечения шириной 290 мм и высотой 50 мм в свету. В дне средней части рабочего участка (рис. 2) сделан симметричный прямоугольный вырез длиной 240 мм и шириной 200 мм, под которым расположена кассета для размещения контейнера с исследуемым образцом грунта.

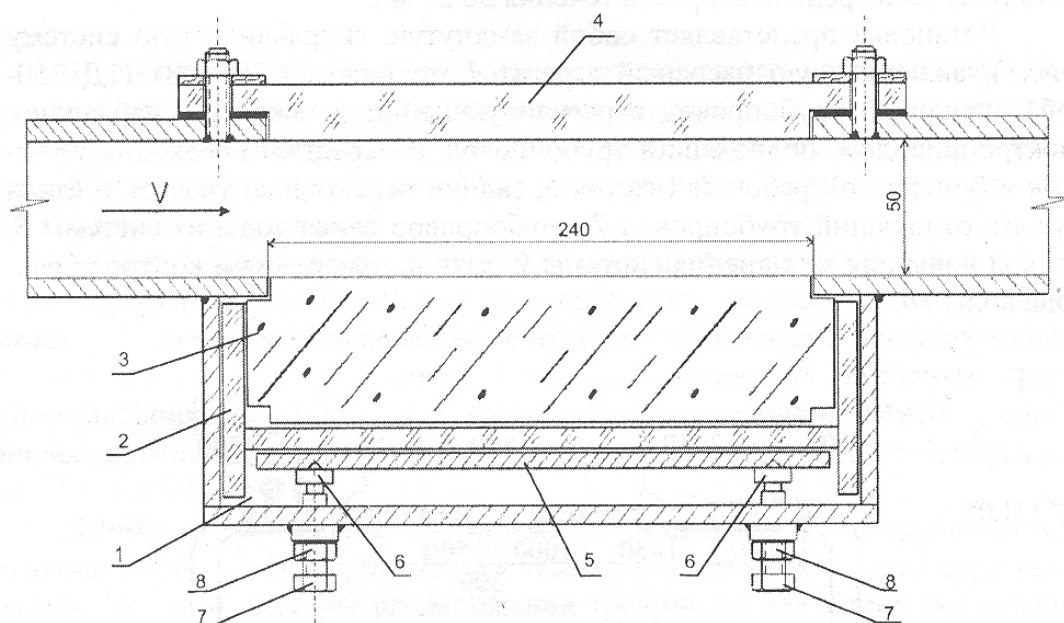


Рис. 2. Рабочий участок установки:

1 – камера рабочего участка; 2 – контейнер; 3 – исследуемый образец; 4 – смотровое окно;
5 – подъемная пластина; 6 – центровочные втулки (4 шт.); 7 – прижимные винты (4 шт.);
8 – контргайки (4 шт.). Размеры даны в мм

Поверхность исследуемого образца выставлялась заподлицо с дном. Площадь образца, подвергаемая размывающему воздействию потока, была таким образом, равна площади выреза в дне рабочего участка $F = 0,24 \cdot 0,2 = 0,048 \text{ м}^2$. Для наблюдения за процессом размыва грунта в потолок трубы было вмонтировано смотровое стекло, нижняя поверхность которого расположена заподлицо с потолком трубы рабочего участка.*

При проведении опытов расход воды в замкнутой гидравлической системе измерялся портативным ультразвуковым расходомером-счетчиком «ВЗЛЕТ ПР». По известному расходу воды и площади поперечного сечения рабочего участка определялась средняя скорость потока, действующего на образец.

Грунты для исследований отбирались на берегах и склонах долины р. Тосна (Ленинградская область). Всего было отобрано 5 отдельностей: 2 отдельности песчаника, 2 отдельности известняка и 1 отдельность доломита, из которых были изготовлены образцы, соответствующие размерам камеры рабочего участка установки.

* В разработке проекта экспериментальной установки, ее монтаже и наладке активное участие принимал зам. заведующего лабораторией гидравлики ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева» канд. техн. наук А.А.Исаев, которому авторы выражают свою глубокую признательность.

Основные физико-механические характеристики грунтов* приведены в табл.1. В соответствии с классификацией ГОСТ 25.100-95 [10] все отобранные образцы относятся к скальному типу; по классификации В.А.Ломтадзе [11], предлагаемой в учебниках для вузов, песчаники (образцы 1 и 4) являются полускальными грунтами, а известняки (образцы 2, 3) и доломиты (образец 5) должны быть отнесены к скальным породам.

Наибольшей прочностью на сжатие обладает образец № 5 – доломит известковистый, нетрещиноватый (у него также наибольшая минеральная плотность, наименьшая пористость и наибольшая плотность породы). Наименее прочным является образец № 4 – песчаник глауконитовый, выветрелый, коричневый. Образец № 1 – песчаник оболочковый, трещиноватый, светло-серый, за исключением трещиноватости, лишь немного отличается по характеристикам пористости от образца № 3 – известняка доломитизированного, розовато-серого, с редкими крупными порами, но при этом втрое слабее его по прочности на сжатие. Образец № 2 – известняк доломитизированный, розовато-серый по своим прочностным характеристикам занимает промежуточное положение между образцами № 3 и № 5.

Размываемость образцов под воздействием потока оценивалась визуально и определялась инструментально весовым способом как разность их масс до и после опыта.

В работе использовались два метода взвешивания:

взвешивание насыщенного водой образца – метод “мокрого” взвешивания;

взвешивание образца, высушенного до стабилизации его массы либо в условиях воздушно-сухого состояния (при комнатной температуре и влажности), либо в электрическом сушильном шкафу (СЭШ) – метод “сухого” взвешивания.

При использовании метода “мокрого” взвешивания образец предварительно замачивался в емкости с водой (если перед опытом он находился в воздушно-сухом состоянии) и помещался в контейнер.

Взвешивание осуществлялось на лабораторных электронных весах “Shinko AJ-12KCE” (Япония) с ценой деления 100 мг.

В опытах 1 – 16 наряду с методом “мокрого” взвешивания использовался и метод “сухого” взвешивания образцов, доведенных до стабилизированного воздушно-сухого состояния: образца 2 – после опыта 2, образца 5 – после опыта 4, образца 3 – после опытов 6, 13, 14, 15, образца 1 – после опыта 8 и образца 4 – после опытов 12 и 16.

Начиная с опыта 18, использовался только метод “сухого” взвешивания с высушиванием образцов в СЭШ. Поначалу предпочтение было отдано методу “мокрого” взвешивания (опыты 1 – 16). При этом предполагалось, что образец, предварительно замоченный в течение 1,5 – 3,0 сут при давлении близком к атмосферному $p \approx p_a$, полностью насыщается водой и его водонасыщение не изменяется в процессе проведения опыта.

* Авторы выражают свою искреннюю благодарность сотрудникам лаборатории инженерной геологии и геокриологии ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева»: гл. научному сотруднику, доктору геол.-минер. наук О.К.Воронкову и ст. научному сотруднику Г.А.Моторину за работу по описанию и определению характеристик исследованных грунтов.

Таблица 1

**Физические и физико-механические свойства горных пород
(нижний ордовик О₁ палеозоя Pz; отобранные из обнажений на берегу р. Тосна, Ленинградская область)**

№№ образ-ца	Порода	Минеральная (истинная) плотность породы γ , г/см ³	Плотность породы δ , г/см ³	Общая пористость n , %	Открытая (сообщающая) пористость $n_{откр.}$, %	Скорость продольной волны $V_{P(XY)}$, м/с	Скорость продольной волны $V_{P(Z)}$, м/с	Коэффициент анизотропии $K_a = \frac{V_{P(XY)}}{V_{P(Z)}}$	Прочность на сжатие по оси Z, $R_{сж}$, МПа	Динамический коэффициент Пуассона μ_d	Динамический модуль упругости $E_{D(Z)}$, МПа	Водопоглощение W , доли единицы	Коэффициент размокания $K_p = \frac{(R_{сж})_{вод}}{(R_{сж})_{сух}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Песчаник оболовый, трещиноватый, светлый-серый	2,65	2,46 (2,50)	7,2	4,0	3130 (4810)	3310 (3910)	0,95 (1,23)	20 (13)	0,15	12300	0,016	0,65
	То же, на локальных участках без трещин					4470 (5030)	5100 (4690)	0,88 (1,07)	60 (39)		29200		
2	Известняк доломитизированный, розовато-серый	2,75	2,63 (2,67)	4,4	4,0	5260 (5020)	5070 (4950)	1,04 (1,01)	60 (45)	0,24	27700	0,015	0,75
3	Известняк доломитизированный, с редкими крупными порами, розовато-серый	2,73	2,49 (2,55)	8,8	6,0	5380 (5450)	5170 (4950)	1,04 (1,10)	65 (39)	0,24	27300	0,024	0,60
4	Песчаник глауконитовый, выветрелый, коричневый	2,65	2,23 (2,28)	15,9	5,0	2920 (2980)	2650 (2800)	1,10 (1,06)	15 (7)	0,20	6800	0,023	0,46
5	Доломит известковистый, нетрещиноватый	2,88	2,81 (2,83)	2,5	2,0	6110 (6240)	4730 (4950)	1,29 (1,26)	90 (67)	0,26	25000	0,007	0,84

Примечания: 1. $V_{P(XY)}$ – скорость продольной волны вдоль длинных граней образца (в горизонтальной плоскости); $V_{P(Z)}$ – то же вдоль короткой грани (в вертикальной плоскости);

2. Графы 3, 11 заполнены по данным справочников для образцов-аналогов; графа 10 – по корреляционной связи $R_{сж} = f(V_P)$, графа 14 – по корреляционной связи $K_p = f(n)$ для пород-аналогов; остальные графы – данные экспериментов;

3. В графах 4, 7 – 10 численные значения величин, указанные без скобок, характеризуют воздушно-сухое состояние грунтов, значения в скобках – водонасыщенное состояние (в условиях свободного водонасыщения).

Однако уже первые опыты опровергли это предположение: вне зависимости от того, происходил или не происходил размыв, масса образцов после опыта увеличивалась за счет их дополнительного водонасыщения под давлением p , существенно большим атмосферного p_a , и составлявшим в камере рабочего участка установки около 3 атм. Это обстоятельство предопределило необходимость проведения дополнительного исследования, целью которого было определение зависимостей от времени интенсивности водонасыщения образцов под давлением и интенсивности их водоотдачи после опыта. Полученные результаты позволили разработать специальную расчетную схему, позволявшую привести потери массы образцов, полученные методом "мокрого" взвешивания, к потере массы "сухого" образца. Погрешность определения изменения массы образца методом "мокрого" взвешивания составляла $\pm 5,0$ г.

При определении степени размываемости образцов методом "сухого" взвешивания учитывалась зависимость массы образца от температуры его нагрева в СЭШ. Обычно нагрев образца в СЭШ осуществлялся до $68 - 76^\circ\text{C}$, изредка до $80 - 90^\circ\text{C}$. Оставленный в остывшем СЭШ на ночь образец увеличивал свою массу за счет впитывания атмосферной влаги, проникавшей в СЭШ через отверстие для термометра. Разность масс остывшего и нагретого образца составляла, как правило, $1,5 - 2,0$ г. При определении потери массы образца в проведенном опыте учитывались обе оценки: по нагретому и по остывшему образцу. Погрешность "сухого" взвешивания обусловлена ценой деления используемых весов $\Delta = 0,1$ г.

Сведения об основных характеристиках опытов, условиях их проведения и полученных результатах представлены в табл. 2. В эту таблицу не внесены данные 2-х опытов: 16-го и 17-го. В первом из них (опыте 16) в процессе прерывания исследования для промежуточных взвешиваний образца 4 дважды не удавалось установить при запуске установки нужную скорость потока $4,4$ м/с, в результате чего из-за превышения в течение $10 - 20$ с этой скорости в $2 - 3$ раза были получены искаженные результаты, которые не могли быть использованы в дальнейшем анализе. Опыт 17, проводившийся с образцом 3, носил демонстрационный характер и не сопровождался необходимыми измерениями массы образца и скорости потока.

В графе 2 табл. 2, помимо номера образцов буквами А и Б обозначены их плоскости, обращенные при проведении опыта кверху и подвергавшиеся воздействию потока. Кроме того, в некоторых опытах с образцом 4 (песчаник) индексом «к» указывается, что они проводились с образцом, склеенным плитонитом, после того, как при извлечении образца для промежуточного взвешивания в процессе опыта 9 он раскололся. Произошедшее при склейке изменение массы образца учитывалось при обработке результатов опытов. Следует отметить, что образец 1 (тоже песчаник) подвергался исследованиям во всех опытах только в склеенном состоянии.

Изменение массы образца 3 (доломитизированный известняк), ни в одном опыте не подвергнувшегося размыву, в процессе исследований происходило трижды:

при извлечении образца из камеры рабочего участка установки после опыта 6 от него откололся осколок массой $17,6$ г; поэтому начальные масса и объем этого образца в опыте 13 соответственно уменьшились по сравнению с их значениями в опытах 5 и 6;

перед опытом 14 на поверхности Б образца 3 была создана искусственная шероховатость путем сверления лунок диаметром 8 – 10 мм и глубиной 4 – 6 мм, равномерно распределенных по всей поверхности Б и отстоящих друг от друга на 30 – 40 мм; при этом начальные масса и объем образца 3 в опытах 14 и 15 уменьшились по сравнению с их значениями в опыте 13;

перед опытами 26 и 27 пришлось осуществить вынужденное изменение массы и объема образца 3 за счет подрезки его основания со стороны А под углом около $2,5^\circ$ для подъема под этим углом вдоль потока стороны Б.

Таблица 2

Основные характеристики образцов, условия проведения
и результаты опытов

№ опыта	№ образца; поверхность (сторона)	Начальная масса сухого образца G_0 , г	Масса образца, высушенного после опыта до стабилизации G , г	Скорость потока V , м/с	Длительность опыта T , ч	Оценка потери массы сухого образца (при $t^\circ = 18^\circ\text{C}$)		Интенсивность размыва $I = \Delta G / (TF)$, г/(ч·м ²)
						визуальная	инструментальная ΔG , г	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2;А	6759,8	—	25,9	13,2	нет	—	0
2			6760,0	25,9	9,3		0	0
3	5;А	6571,3	—	25,8	8,2	нет	—	0
4			6570,8	25,6	7,3		0	0
5	3;А	6631,2	—	26,0	8,0	нет	—	0
6			6631,2	25,9	10,0		0	0
7	1;А	6322,9	—	25,8	13,5	есть	(1,8)	2,78
8	1;Б	—	6318,2	25,8	21,7	нет	(2,3)	2,21
9	4;А	4802,8	—	22,5	10,5	есть	(108,4)	215,08
10		—	—	17,3	15,0		(19,0)	26,39
11		—	—	10,9	16,0		(20,7)	26,95
12		—	4650,0	7,8	17,5		(4,7)	5,60
13	3;Б	6613,6	6613,8	25,7	9,0	нет	0	0
14	3с;А	6589,6	6589,5	25,9	5,7	нет	0	0
15	3с;Б	6589,6	6589,5	26,0	17,3		0	0
18	4к;А	4674,5	4673,0	5,5	18,0	нет	1,5	1,74
19	1;Б	6371,2	6315,1	25,9	18,0	нет	2,1	2,43
20	4к; А	4673,0	4671,5	13,2	18,0	нет	1,5	1,74
21	1;А	6315,1	6313,1	25,9	16,0	нет	2,0	2,60
22	4к;А	4671,5	4669,0	19,6	18,0	есть	2,5	2,89
23	1;А	6313,1	6311,2	23,8	18,0	есть	1,9	2,20
24	4к;А	4669,0	4668,0	8,4	18,0	нет	1,0	1,16
25	1;А	6311,2	6309,9	19,2	18,0	нет	1,3	1,50
26	3с;Б	5897,8	5891,2	20,1-25,8	18,0	нет	6,6	7,64
27	3с;Б	5890,9	5891,2	20,1-25,8	18,0	нет	0	0

Примечание: В графе 8 в скобках указаны значения ΔG , полученные косвенным путем – пересчетом результатов “мокрого” взвешивания (опыты 9 – 12) и пропорциональным делением (опыты 7, 8).

Создание искусственной шероховатости (лунок) на поверхности Б и подъем низового края этой поверхности (для создания ускорения течения) производились чтобы как-то спровоцировать размыв известняка. Однако ни в том, ни в другом случае образец не размывался. Полученная по результатам “сухого” взвешивания потеря массы $\Delta G = 6,6$ г в опыте 26 не подтверждалась тщательным осмотром образца, не показавшим никаких признаков размыва. Дополнительный опыт 27, в котором были в точности повторены условия опыта 26, позволил утвердиться в ошибочности инструментальной оценки результата опыта 26. Возможной причиной этой ошибки предположительно является то, что перед проведением опыта 26 образец не был высушен до стабилизации его массы, и взвешивание показало завышенное ее значение. Существенную роль в определении массы “сухого” образца грунта могла играть влажность воздуха в лабораторном помещении, в котором происходило высушивание образца после проведения опыта и его остывание после извлечения из СЭШ, когда содержание влаги в “сухом” образце приходило в соответствие с влажностью окружающей воздушной среды.

Это обстоятельство может оказывать ощутимое влияние на точность определения потери массы “сухого” образца – показателя, приведенного в графе 8 табл. 2. Конкретно это видно на анализе результатов опытов, проведенных с образцами 2 и 3 (доломитизированные известняки) и образцом 5 (известковистый доломит). Во всех проведенных с ними опытах эти грунты, как показал их визуальный осмотр (в том числе, сличение фотоснимков), проявили устойчивость к размыву, то есть изменения их массы в процессе опыта не происходило. В то же время по результатам взвешиваний до и после опытов 1, 2, 13 и 27 было зафиксировано приращение их массы (до 0,3 г). Единственной причиной этого являлось увеличение содержания в образцах влаги, поскольку масса грунтовой их составляющей в процессе опыта не могла возрасти ни при каких обстоятельствах.

В опытах 3, 4, 14 и 15 результаты взвешивания до и после опытов показали уменьшение на 0,5 г массы образца известняковых доломитов и на 0,1 г доломитизированных известняков. Однако визуальный осмотр образцов после опытов дает основание считать, что и в этом случае изменение массы образцов отражает лишь изменение их влажности. Исходя из этих соображений, в графу 8 табл. 2 для опытов 1 – 4, 13 – 15 и 27 внесено округленное значение $\Delta G = 0$ г.

Значительно сложнее обстоит дело с интерпретацией результатов взвешивания образцов песчаника 1 и 4, подвергавшихся размыву. Структура этого грунта не всегда позволяла на основании визуального осмотра образца уверенно судить о том, произошел размыв или нет. Еще неопределеннее становилось влияние влажности на массу “сухого” образца. Поэтому было решено в полученные по результатам взвешивания значения ΔG не вводить поправок на различные влажности, отдавая себе отчет в том, что при графической обработке данных проведенных опытов этот фактор будет обуславливать усиленный разброс точек и затруднять построение аппроксимирующих их зависимостей. Так в опытах 19 и 21 с высушиванием образца 1 в СЭШ до и после каждого опыта потери массы с обеих сторон образца оказались практически одинаковыми: 2,1 г со стороны Б (опыт 19) и 2,0 г со стороны А (опыт 21). При этом по визуальной оценке в обоих опытах размыв не просматривался. Это обстоятельство было учтено

при обработке результатов опытов 7 и 8, проводившихся практически при тех же скоростях и с тем же образцом 1. Суммарная потеря массы образца в этих опытах составила 4,7 г. По визуальной оценке она была целиком отнесена на счет размыва стороны А и смыва тонкого ($\approx 0,5$ мм) слоя плитонитовой склейки. При плотности плитонита $\rho_{пл} = 15$ г/см³ и площади смытого пятна $F \approx 7,5$ см² (по результатам его обмера) масса смытого плитонита была принята равной $\Delta G \approx 0,6$ г, а потеря “сухой” массы образца в этих опытах $\Delta G \approx 4,1$ г. Основываясь на результатах опытов 19 и 21, исполнители сочли возможным разделить это значение пропорционально времени воздействия потока на обращенную к нему сторону образца и принять: в опыте 7 $\Delta G = 1,8$ г, в опыте 8 $\Delta G = 2,3$ г – с небольшим преобладанием интенсивности размыва в опыте 7, в котором он был визуально обнаружен. В графе 8 табл. 2 принятые значения ΔG указаны в скобках.

По результатам измерений потери массы определена интенсивность $I = \Delta G / (TF)$ размыва образца, то есть количество смытого потоком материала ΔG (г) с единицы площади F (м²) его поверхности за единицу времени T (ч). Результаты измерений потери массы во всех опытах, проведенных с образцом 1, нанесены на график $I = f(V)$ (рис. 3), позволивший определить для этого образца значение неразмывающей скорости $V_n \approx 11,0$ м/с.

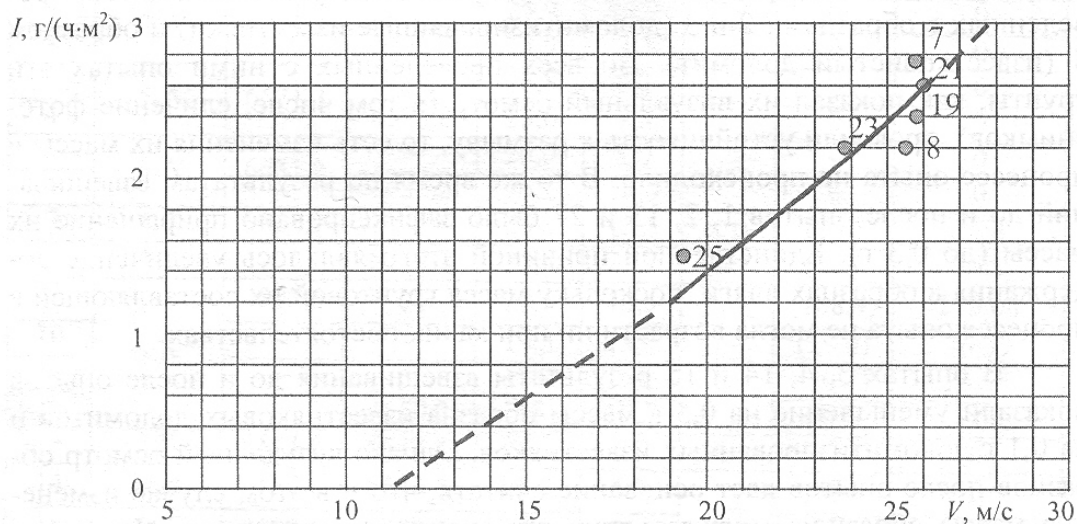


Рис. 3. Зависимость интенсивности размыва облового песчаника (образец 1) от скорости течения воды (Точки с числами – результаты опытов и их номера)

Визуальные наблюдения показали, что со стороны А образца 1 размыву подвергались небольшие вкрапления светлого песчаника (по-видимому, менее прочного, чем основная порода). Общая площадь вкраплений составляет около 7 – 10% от площади поверхности А. Размыв этих вкраплений становится особенно заметным, когда образовавшееся углубление окаймляется почти вертикальными краями.

Заметить изменение рельефа поверхности образцов песчаника за один опыт оказалось возможным только в редких случаях. Как правило, обнаружить размыв удавалось после нескольких опытов с образцом, обращенным к потоку одной и той же стороной.

Так, при достаточно большой потере массы в серии опытов 9 – 12 с образцом 4 визуальное впечатление размыва поверхности А образца 4 возникло через 3 часа опыта 9 и, несмотря на то, что еще через 2 часа образец

раскололся, уверенно подтвердить это наблюдение фотофиксацией удалось лишь к концу опыта 10, то есть через 25 часов. В этой серии опытов измерение потери массы “сухим” взвешиванием было произведено только после проведения последнего опыта 12. Было установлено, что масса образца в результате уменьшилась на 152,8 г. Для того, чтобы установить какая доля этого итога относится к каждому из входивших в серию опытов, были использованы результаты “мокрого” взвешивания, производившегося перед началом и после окончания опыта. При этом учитывались закономерности, описывающие изменение во времени водонасыщения “сухого” образца грунта, помещенного в водную среду, и водоотдачи образца, извлеченного из воды и помещенного в естественную воздушную среду лабораторного помещения. Такие закономерности были установлены, как упоминалось ранее, на основании обработки результатов многократных взвешиваний образца в процессе подготовки к опытам. В итоге были получены данные, характеризующие потерю массы “сухого” образца ΔG в каждом из входивших в серию опытов. В табл. 2 они указаны в скобках. Наибольшая потеря массы произошла в опыте 9 при скорости течения 25,8 м/с. В этом же опыте образец раскололся. В последующих опытах, проводившихся с расколотым образцом, скорость постепенно уменьшалась; уменьшалась и потеря массы образца: в опытах 10 и 11 она уменьшилась примерно в 5 раз, а в опыте 12 – более чем в 20 раз по сравнению с опытом 9.

Такое соотношение интенсивностей потери массы образца 4 в опытах 9 – 12, помимо уменьшения скорости, может быть объяснено следующими факторами.

1. Отдельность песчаника, из которой был изготовлен образец 4, в природных условиях была подвержена атмосферному воздействию, которое наибольшим образом сказывалось на менее прочных поверхностных слоях этой высокопористой породы, еще больше ослабляя их прочность.

2. Подрезка образца под размеры контейнера и окна в дне установки тоже не могла не ослабить прочность поверхностных слоев образца, но при этом какая-то часть слоев, ослабленных атмосферным воздействием, была срезана.

3. В опыте 9 образец 4 впервые подвергся воздействию потока, причем сразу же – наибольшей скоростью.

4. После того, как в середине опыта 9 образец 4 раскололся, в трещине раскола образовалось много мелких осколков, зажатых краями трещины. Часть осколков была сразу же вынесена потоком, другая часть провалилась на дно контейнера. По мере вымыва из трещины самых мелких частиц более свободными становились осколки размером крупнее вымытых, которые тоже постепенно смывались потоком. Срыв осколков мог происходить в любом из опытов случайным образом, поскольку при извлечении контейнера из установки для взвешивания образца трещина освобождалась от стеснения, и осколки могли перегруппировываться.

Совокупностью этих факторов объясняются и высокая интенсивность размыва рыхлого поверхностного слоя образца 4, и ослабление интенсивности размыва по мере того, как этот слой смывался, а на его месте оказывался более спрессованный слой породы, и случайный срыв осколков, зажатых в трещине, в опыте с меньшей скоростью потока. При этом общая зависимость потери массы образца от скорости потока характеризует падение интенсивности размыва с уменьшением скорости течения.

Результаты всех опытов, проведенных с образцами песчаника 4 и 4к, представлены на рис.4. Точки на графике $I=f(V)$ разделились на две группы:

точки опытов 9 – 12 и опыта 18, хорошо вписавшегося в эту группу с повышенной интенсивностью размыва и потери массы образца, объясняющейся совокупностью упомянутых факторов;

точки опытов 20, 22, 24 с интенсивностью размыва во много раз меньшей.

В поле каждой из этих групп точек проведены свои кривые $I=f(V)$, верхняя из которых иллюстрирует главным образом размыв менее прочного поверхностного слоя и вынос осколков, а нижняя – размыв более прочного монолита образца 4. Значительный разброс точек, по которым проведена верхняя кривая, является следствием случайного процесса выноса осколков.

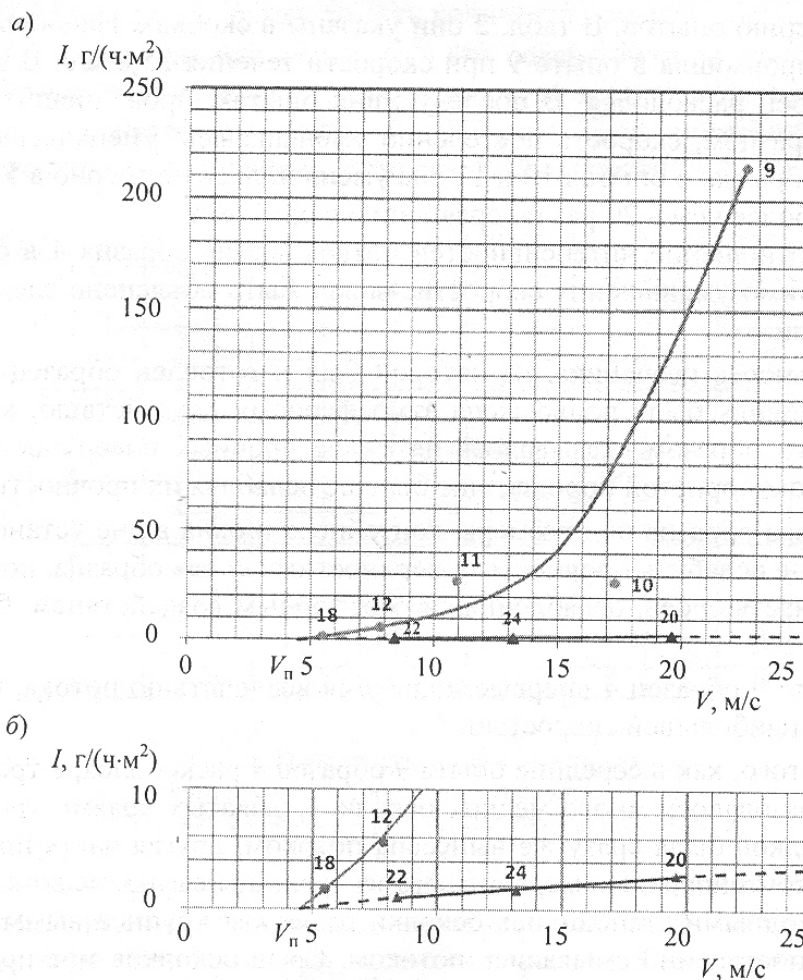


Рис. 4. Зависимость интенсивности размыва глауконитового песчаника (образец 4) от скорости течения воды:

а – результаты всех опытов; б – нижняя часть графика.
(Точки с числами – результаты опытов и их номера)

До построения графиков рис.4 опыт 18 (с образцом 4к) был автоматически отнесен ко второй группе опытов, и было сделано предположение, что отклонение результата опыта 18 от точек этой группы опытов отражает различие в пределах стабилизации массы образца при разных режимах его высушивания: до опыта – воздушное высушивание, после опыта – высушивание в СЭШ. Выполненная проверка этого предположения не подтвер-

дила его: замоченный после высушивания в СЭШ по окончании опыта 18 образец был высушен на воздухе, и значение его “воздушно-сухой” массы практически повторило массу после высушивания в СЭШ.

После того, как были построены графики рис.4, стало понятно, что в опыте 18 проявился и закончился процесс смыва с поверхности А образца 4 (точнее, уже 4к) менее прочного слоя, и этот опыт должен быть отнесен к 1-ой группе опытов.

Кривые $I=f(V)$ обеих групп опытов на рис.4 сходятся к одной точке $V \approx 4,5$ м/с при $\Delta G/(TF) = 0$. Эта средняя скорость потока является “неразмывающей” V_n для песчаника образца 4. Она характеризует уравнивание силового воздействия потока на прочные слои песчаника силами сопротивления этих слоев.

Выводы

На основании обобщения полученных в опытах результатов установлено следующее.

1. Известняки (образцы 2 и 3) и доломит (образец 5) не размываются водным потоком, перемещающимся по их поверхности со средней скоростью, доходящей до 26 м/с; с учетом того, что колебания расхода воды в процессе опытов достигало $\pm 5\%$ от среднего значения, можно утверждать, что исследованные грунты не подвергаются размыву при скоростях течения до 27,5 м/с.

Общая длительность воздействия потока на обращенную к нему поверхность образцов составляла: 22,5 ч – для образца 2 в серии опытов 1–2; 18 ч – для образца 3 в сериях опытов 5–6 и 13–15; 36 ч – в серии опытов 26 – 27; 15,5 ч – для образца 5 в серии опытов 3 – 4.

Создание искусственных неровностей в виде лунок на поверхности самого слабого по всем показателям (плотность, пористость, прочность на сжатие, водопоглощение) скального образца 3 и придание ему обратного уклона для ускорения потока не привело к усилению его воздействия на грунт, который и в этих условиях оставался устойчивым к размыву.

2. Песчаники могут подвергаться размыву даже при сравнительно малых значениях скорости воздействующего на них потока. В зависимости от механических показателей породы неразмывающая скорость может меняться в достаточно широком диапазоне. Исследованные в работе образцы характеризуются неразмывающими скоростями, составляющими для облового трещиноватого песчаника около 4,5 м/с, а для выветрелого глауконитового песчаника – около 11,0 м/с.

Как показали исследования, размыв песчаника существенно зависит от степени их выветрелости: сначала интенсивно размываются ослабленные менее прочные участки поверхностных слоев породы; по мере того, как на поверхности оказываются более прочные слои породы, интенсивность размыва при той же скорости потока постепенно затухает.

3. Относительно высокая прочность материала скалы в монолите по сравнению со сцеплением между ее отдельностями и прочностью заполнителя трещин является причиной того, что размыв природных скальных массивов, подверженных воздействию высокоскоростным потоком, происходит при скоростях, достаточных для нарушения связи между отдельностями (породными блоками) и существенно меньших, чем скорости, при которых могло бы происходить “размывание” скального монолита [12–14].

Исследования размывающего воздействия высокоскоростного потока на монолитные образцы известняков и доломита, не являющихся особо прочными скальными породами, явились дополнительным подтверждением блочного механизма размыва скалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов.** СО 34.21.204-2005 / РАО «ЕЭС России». СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева». 2006.
2. **Мирихулава Ц.Е.** Основы физики и механика эрозии русел. Л.: Гидрометеониздат. 1988.
3. **Parteniades E.** Erosion and deposition of cohesive materials // *River Mechanics*. v.2. Edited and published by prof. H.W.Shen. Ch.25, p.91. Fort Collins, CO. USA. 1971
4. **Ахмедов Т.Х.** Размыв скального русла. Алма-Ата: Изд-во «Наука» КазССР. 1982.
5. **Вовкушевский В.И.** Причины и формы повреждений сооружений Большого Карагандинского водохранилища // *Гидротехническое строительство*. 1947. №6. С.16-19.
6. **Токарев И.И.** Опыт строительства плотины на выветренных скальных грунтах // *Гидротехническое строительство*. 1952. №10. С.18-21.
7. **Хапаева А.К.** Модельные исследования размывов русла в нижнем бьефе гидроузла и сопоставление их с данными натурных наблюдений // *Труды ВАСХНИЛ «Работы нижних бьефов гидротехнических сооружений»*. М.: Колос. 1969. С. 146-154.
8. **Ribeiro A.A., da Cunha L.V., da Silva D.P., Lemon F.O.** Erosion in concrete and rock due to spillway discharges // *Ninth International Congress on Large dams*. R.19. vol.II. Istanbul. 1967
9. **Riquois M., Praff, Savey et d'autres.** Problemes poses par l'exploitation et l'entretien des organes d'evacuation des barrages // *Neuvieme Congres International des Grands Barrages*. R.28. Vol.II. Istanbul. 1967
10. **ГОСТ 25100-95.** Грунты. Классификация. М.: Изд-во стандартов. 1996.
11. **Ломтадзе В.Д.** Инженерная геология. Л.: Недра. 1984.
12. **Рубинштейн Г. Л.** Лабораторные исследования местного разрушения скалы в нижних бьефах высоких водосливных плотин // *Труды координационных совещаний по гидротехнике*. Вып. VII. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1963. С. 375-394.
13. **Швайнштейн А.М.** Водосбросы зарубежных гидроузлов с высокими бетонными плотинами. Л.: Энергия. 1973.
14. **Гуреев А.М.** Об инженерно-геологической характеристике скального основания при оценке его устойчивости в отношении размыва высокоскоростным потоком // *Труды координационных совещаний по гидротехнике*. Вып. 52. Л.: «Энергия». 1969. С. 552-565.