

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ БЕРЕГОВОГО СКЛОНА, ВКЛЮЧАЮЩЕГО МЕРЗЛЫЙ ГРУНТ*

В.К. Дебольский^{1,2}, Д.Н. Ионов¹, И.И. Грицук^{1,2},
Н.К. Пономарев², Е.К. Синиченко²

¹ Институт водных проблем Российской академии наук
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333

² Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

Выполнен первый этап исследований деформаций берегов, на лабораторной модели, сложенных многолетнемерзлыми грунтами, при воздействии волн с различными характеристиками. Прослеживается взаимосвязь между объемами деформаций, их параметрами и волновыми характеристиками. Также выявлена прямая зависимость механизма формирования склона от критериев волновых воздействий.

Ключевые слова: параметры волнения, деформации берегов, многолетнемерзлые грунты, экспериментальные исследования, лабораторная модель.

Исследования деформаций берегов, сложенных многолетнемерзлыми грунтами, на лабораторной модели были проведены в открытом гидравлическом лотке (далее — лоток) Лаборатории гидрологической и технической безопасности гидросооружений кафедры гидравлики и гидротехнических сооружений инженерного факультета Российского университета дружбы народов.

В качестве материала, слагающего модель, использовался карьерный люберецкий песок естественного состояния крупностью $d_{50} = 0,20$ мм. Надводная часть модели берегового склона выдерживалась в морозильной камере при температуре -18 °С в течение 24 час., а параметры назначались в соответствии с представленными ниже схемами (рис. 1).

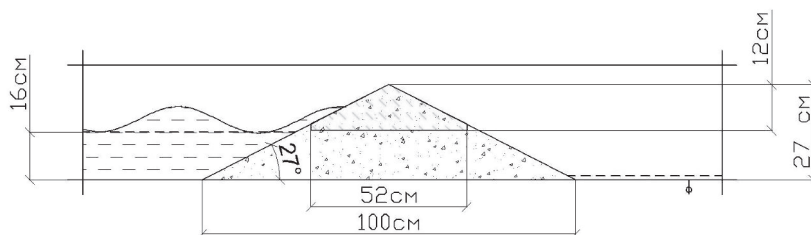


Рис. 1. Схема гидравлической модели

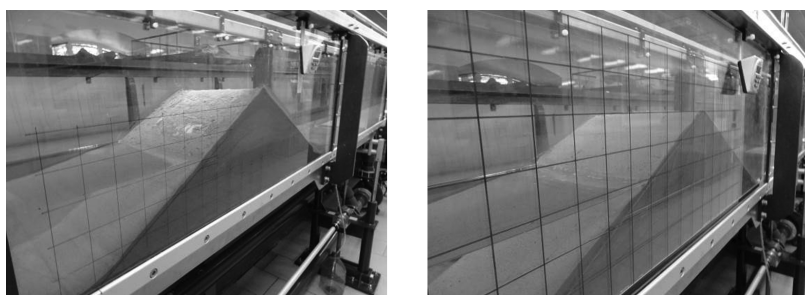
Лоток циркуляционного типа с возможностью изменения уклона дна в сечении имеет прямоугольную форму и оснащен программируемым волнопродуктором. Его длина составляет 16,0 м, ширина 0,3 м, высота стенок 0,4 м.

* Работа проведена при поддержке РФФИ, в рамках гранта №13-05-41095 РГО_а.

Модель представляет собой отсыпку из песка крупностью $d_{50} = 0,20$ мм с углами откосов 27° . Ее габариты: высота 27 см, длина в основании 100 см, ширина 30 см. Глубина воды перед моделью составляет 16 см. Для экспериментов с замороженным грунтом верхняя часть модели (12 см от ее общей высоты) выдерживалась в морозильной камере в течение 24 часов при температуре -18°C , предварительно грунт увлажнялся, после чего замороженная часть устанавливалась на нижнюю, заранее отсыпанную в лотке часть модели. Для экспериментов с грунтами, имеющими положительные температуры, модель формировалась увлажненным грунтом на всю высоту (27 см) непосредственно в самой лотке (рис. 2—4).



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки



а

б

Рис. 3. Общий вид модели:

а — модель подготовленная для проведения эксперимента (верхняя часть выдержана в морозильной камере при температуре -18°C);
 б — модель, подготовленная для проведения эксперимента (температура грунта модели 24°C)



а

б

Рис. 4. Основные элементы экспериментальной установки:
 а — волнопродуктор; б — пульт управления волнопродуктором

Эксперименты во всех случаях проводились в такой последовательности:

- установка модели в гидравлический лоток;
- заполнение лотка со стороны волнопродуктора водой до обеспечения необходимой глубины перед моделью (16 см);
- подготовка и настройка оборудования для фото- и видеофиксации эксперимента;
- подготовка измерительного оборудования;
- снятие измерений с модели;
- проведение эксперимента с фиксацией необходимых параметров.

По результатам первого этапа исследований на лабораторной модели было проведено более 40 экспериментов с целью определения оптимальных волновых и модельных параметров, а также методики эксперимента в целом. В результате анализа результатов предварительных экспериментов были определены наиболее подходящие для целей исследования волновые характеристики, на основании которых выполнены чистовые эксперименты. Следует отметить, что повторяемость результатов одного эксперимента достаточно высокая, а разница показаний между экспериментами, проведенными при одинаковых волновых и модельных параметрах, варьируется от 1 до 4%.

На протяжении всего эксперимента проводилась фото- и видеосъемка процесса деформации верхового откоса и параметров набегания волны на откос. Время проведения эксперимента фиксировалось секундомером, который на всем его протяжении находился в поле зрения объектива видеокамеры (в кадре). Отсчет времени производился с начала запуска волнопродуктора; окончанием работы (для экспериментов с замороженным грунтом) являлся момент обрушения верхней, размывтой части модели. Волнопродуктор программировался через ЭВМ лицензионным программным комплексом Wave Generator Version 1.33 02/03/00. Впоследствии все эксперименты повторялись на моделях с положительной температурой, а время проведения этих экспериментов было принято равным времени проведения экспериментов на замороженной модели.

По результатам каждого эксперимента производился замер отфильтрованной через тело модели воды посредством дренажного отверстия, находящегося в 30 см от модели со стороны низового откоса. По окончании эксперимента все данные фиксировались в специальную форму, созданную при помощи программного комплекса для работы с электронными таблицами, возможностью упорядочивания, представления и вывода данных Microsoft Excel. Также для более точного измерения геометрических параметров модели и волновых воздействий на нее (длины набегания волн на верховой откос, углы сформированных склонов и откосов и т.д.) использовалась двухмерная система автоматизированного проектирования и черчения, разработанная компанией Autodesk, — AutoCAD. В качестве вспомогательного элемента для визуальной оценки модели и проводимого на ней эксперимента был выполнен прозрачный шаблон модели, разлинованный ячейкой 5×5 см, который размещался непосредственно на стенке лотка в месте расположения модели (рис. 5).

В таблице 1 указаны основные параметры проведенных экспериментов и их осредненные результаты.

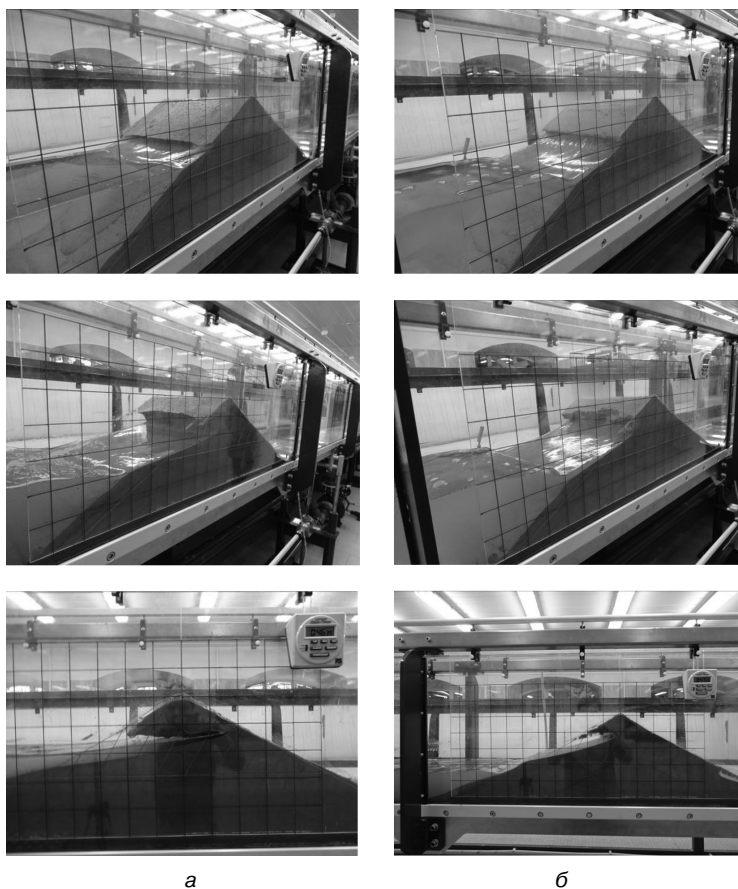


Рис. 5. Процесс деформации модели в ходе эксперимента:
 а — верхняя часть модели выдержана в морозильной камере при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$; б — температура грунта модели $24\text{ }^{\circ}\text{C}$)

По данным экспериментов построены кривые и установлены зависимости для объема деформации модели и общего фильтрационного режима от волновых параметров (рис. 6, 7).

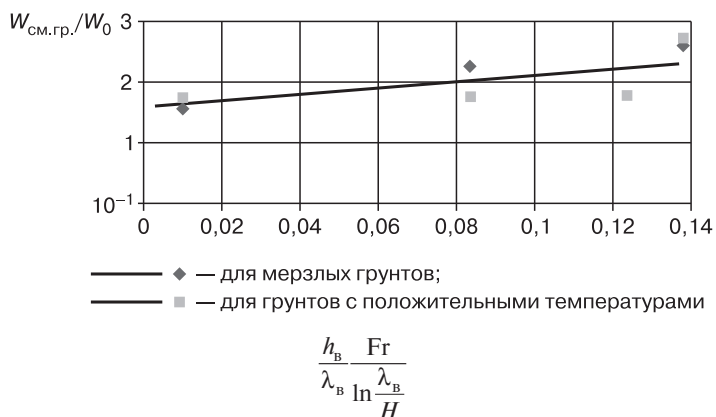


Рис. 6. График зависимости объема деформации мерзлого и немерзлого грунтов моделируемого склона при волновом воздействии

Таблица 1

Сводная таблица параметров модели и результатов экспериментов

Наименование параметра	Ед. изм.	29.09.2014 г.		14.10.2014 г.		24.09.2014 г.		28.10.2014 г.		12.11.2014 г.		13.11.2014 г.		10.12.2014 г.		03.12.2014 г.	
		до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
		Грунт модели — песок (замороженный)				Грунт модели — песок				Грунт модели — песок				Грунт модели — песок			
		1		2		3		4		1		2		4		5	
Температура грунта	°С	-18	-13,5	-18	-14,8	-18	-13,5	-18	-14,5	25	17	26	16	25	19,5	25	18
Объем «смытого» материала	см ³	0	2804	0	2491	0	2344	0	1787	0	2923	0	1803	0	2045	0	2050
Фильтрационный расход в НБ при отсутствии волнения	мл/мин	55,25		55,25		55,25		55,25		76,33		76,33		76,33		76,33	
Фильтрационный расход в НБ	мл/мин	0	74,9	0	78,17	0	66,1	0	61,24	0	118,1	0	105,8	0	108,8	0	88
Высота модели (общая)	см	27	23,3	27	19,4	27	25	27	26	27	20	27	20,5	27	27	27	27
Высота модели (мерзлая часть)	см	14	9,3	14	5,8	14	5,2	14	13	14	7	14	7,5	14	14	14	14
Ширина модели	см	30		30		30		30		30		30		30		30	
Площадь продольного сечения модели (общая)	см ²	1 325	1 232	1 325	1 242	1 325	1 247	1 325	1 266	1 325	1 228	1 325	1 265	1 325	1 257	1 325	1 257
Площадь продольного сечения модели (мерзлая часть)	см ²	356,4	262,9	356,4	273,4	356,4	278,3	356,4	296,8	356,4	258,9	356,4	296,3	356,4	288,2	356,4	288
Угол заложения сформированного склона	°	8		9		9		12		11		16		11		25	
Угол заложения верхового откоса	°	27	31	27	22	27	29	27	30	27	27	27	27	27	31	27	27
Глубина потока в спойном состоянии	см	16		16		16		16		16		16		16		16	
Ширина потока	см	30		30		30		30		30		30		30		30	
Высота волны	см	1,1		2,1		2,1		2,1		1,1		0,9		2,1		2,1	
Длина волны	см	390,0		330,8		254,2		300,0		390,0		330,8		254,2		300,0	
Частота волнения	сек	2:41		2:58		2:20		2:68		2:41		2:58		2:20		2:68	
Уклон дна	°	0		0		0		0		0		0		0		0	
Время проведения эксперимента	мин	00:45:06		00:46:44		00:30:10		02:04:25		00:45:06		00:46:44		00:30:10		02:04:25	

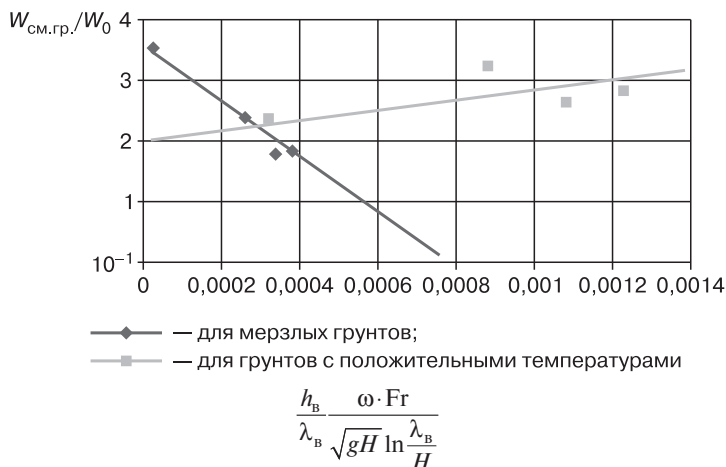


Рис. 7. График зависимости объема фильтрации от волновых параметров

Относительный объем деформации мерзлого и немерзлого грунтов склона при волновом воздействии можно аппроксимировать соотношением (1):

$$\frac{W_{\text{см.гр}}}{W_0} = \frac{1}{4} \left(\frac{h_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}} \frac{\text{Fr}}{\ln \frac{\lambda_{\text{в}}}{H}} \right)^{\frac{1}{15}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{см.гр}}$ — объем грунта смытого в процессе эксперимента; W_0 — общий объем грунта размываемой модели (до начала эксперимента); $h_{\text{в}}$ — высота волны; $\lambda_{\text{в}}$ — длина волны; H — глубина воды перед моделируемой отсыпкой; $\text{Fr} = \frac{V^2}{gh_{\text{в}}}$, где V — скорость набегания волны на верховой откос модели.

Зависимость объема фильтрации от влияния волнового воздействия можно аппроксимировать соотношением (2) для мерзлого и (3) немерзлого грунтов:

$$\frac{W_{\text{фил}}}{W_{\text{наб}}} = 3,3 \cdot 10^2 \left(\frac{h_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}} \frac{\omega \cdot \text{Fr}}{\sqrt{gH} \ln \frac{\lambda_{\text{в}}}{H}} \right)^{-\frac{2}{3}}, \quad (2)$$

$$\frac{W_{\text{фил}}}{W_{\text{наб}}} = 0,82 \left(\frac{h_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}} \frac{\omega \cdot \text{Fr}}{\sqrt{gH} \ln \frac{\lambda_{\text{в}}}{H}} \right)^{\frac{1}{6}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{фил}}$ — фильтрационный расход через тело модели; $W_{\text{наб}}$ — объем набегающей волны; $h_{\text{в}}$ — высота волны; $\lambda_{\text{в}}$ — длина волны; H — глубина воды перед моделируемой отсыпкой;

ω — гидравлическая крупность; $Fr = \frac{V^2}{gh_B}$, где V — скорость набегания волны на верховой откос модели.

Полученные результаты. Проведенные серии экспериментов на лабораторной модели показали, что размыв тела моделируемой преграды, сложенной песком с отрицательной температурой, при возникновении волновых процессов происходит интенсивнее, чем при прочих равных условиях преграды, сложенной песком с положительной температурой.

Объем деформации мерзлой модели в среднем на 27% превышает объем деформации модели сложенной грунтом с положительной температурой.

Серии экспериментов показали, что моделирование волновых процессов и возникающих в результате этих воздействий деформаций, достаточно с большой долей достоверности описывают естественные процессы переформирования берегового склона.

Результаты указанных в данной статье исследований позволяют разработать физико-математическую модель трансформации береговых склонов под воздействием волновых процессов. Ранее подобная фундаментальная проблема не ставилась, однако известны эти явления и их последствия, часто приводящие к катастрофам.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82* [SP 38.13330.2012 Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov). Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.06.04-82*].
- [2] СН 92-60 Технические условия определения волновых воздействий на морские и речные сооружения и берега [SN 92-60 Tekhnicheskie usloviya opredeleniya volnovykh vozdeystviy na morskije i rechnye sooruzheniya i berega].

LABORATORY RESEARCH OF DEFORMATIONS OF THE COASTAL SLOPE INCLUDING FROZEN SOIL

V.K. Debolskiy^{1,2}, D.N. Ionov¹, I.I. Gritsuk^{1,2}, N.K. Ponomarev², E.K. Sinichenko²

¹ Water Problems Institute
Russian Academy of Science

Gubkina str., 3, Moscow, Russia, 119333

² Peoples' Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

The first stage of research deformations shores, on a laboratory model composed of permafrost, under the influence of waves with different characteristics. Traced the relationship between the amount of deformation, their parameters and wave characteristics. Just found a direct dependence of the formation mechanism of the slope on the criteria of wave impacts.

Key words: emotion parameters, strain off the coast, permafrost, experimental studies, laboratory model.