

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН И ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ НИЗКОГО НАПОРА В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Р.В. Чжан

*Институт мерзлотоведения СО РАН им. акад. П.И. Мельникова,  
677018, Якутск, Институт мерзлотоведения, Россия*

Наряду с общеизвестными причинами деформаций грунтовых плотин (сложные геокриологические условия створов, суровый климат, сложные условия строительства и эксплуатации) вскрыты и исследованы специфические виды деформаций сооружений. К ним относятся поперечные морозобойные трещины и полигональные трещины усыхания, которые в ряде случаев являются начальными для развития морозобойных; трещины отслоения грунта от стенок устоев водосбросов. Зафиксированы микроструктурные преобразования грунтовых частиц, изменение гранулометрического состава, плотности упаковки и влажности. Вскрыт механизм отслоения грунта от конструкций водосбросов и измерены в натуральных условиях на действующем сооружении величины перемещения грунтовых частиц, а также давление, которое они оказывают на стенки устоя.

*Плотина, водосброс, мерзлый грунт, деформация, влажность, температура*

### DEFORMATION OF EARTH-FILLED DAMS AND LOW-PRESSURE SPILLWAYS IN THE PERMAFROST AREA

R.V. Zhang

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677018, Yakutsk, Russia*

Along with well-known reasons of deformations of earth-filled dams (complicated geocryological conditions of sections, severe climate, complicated conditions of construction and operation), specific types of deformation of structures have been revealed and studied. These are cross frost cracks and polygonal cracks of drying which in a number of cases initiate the development of frost cracks; cracks of the soil rending from the abutment walls of spillways. Microstructural transformations of the ground particles have been marked as well as changes in granulometric composition, packing density and moisture content. Mechanism of the soil rending from the structures of spillways has been revealed and the magnitude of soil particles movement has been measured under natural conditions on the acting structure as well as the pressure the particles produce on the abutment walls.

*Dam, spillway, permafrost, deformation, moisture content, temperature*

### ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации гидротехнических сооружений водохозяйственного и гидромелиоративного назначения в области распространения многолетнемерзлых грунтов свидетельствует о том, что вопрос обеспечения их устойчивости стоит остро и в настоящее время.

Причины и виды деформаций гидротехнических сооружений описаны и исследованы рядом авторов [Тимофейчук, 1960; Хомзе, 1966; Чжан, 1972; Биянов, 1975; Чжан, 1980]. Разрушающие деформации связаны с недостаточным объемом инженерных изысканий, обусловленных малыми средствами финансирования; отсутствием нормативной базы для этого класса сооружений, позволяющей принять правильные конструктивные решения, которые бы в наиболь-

шей мере учитывали геокриологические и климатические условия строительной площадки [Чжан, 1997].

Несомненно, что при возведении плотин на льдистых основаниях, причинами деформаций является оттаивание последних, а деформации выражаются в виде локальных просадок и провалов; промоин в местах примыкания земляной части плотин к бортам долин рек; продольных трещин и сползание откосов [Тимофейчук, 1960; Хомзе, 1966; Чжан, 1997].

Обследование гидроузлов в натуральных условиях, наряду с вышеуказанными причинами, выявили ряд специфических видов деформаций как тела грунтовых плотин, так и мест примыкания их к водосбросам и водовыпускам. В этой

связи возникла необходимость формулировки и постановки проблемы исследований.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Специфическими видами деформаций являются трещины отслоения грунта от несущих конструкций водосбросов и водовыпусков, а также поперечные морозобойные трещины глухой грунтовой части плотин по трещинам усыхания. Для выяснения природы этих деформаций были выдвинуты следующие рабочие гипотезы.

Глухая часть грунтовой плотины имеет развитую поверхность теплообмена, как правило, в поперечном сечении это трапеция. В силу этого тело плотины испытывает гораздо большие температурно-влажностные градиенты по сравнению с плоскостью. В этом случае естественно предположить, что минеральные частицы дезинтегрируются, а грунтовой массив в целом подвержен морозобойному растрескиванию зимой и трещинам усыхания летом. Дезинтеграция минеральных частиц приводит к изменению гранулометрического состава и прочности грунта.

Причиной разрушения сооружений в местах примыкания грунтовой плотины к водопропускам считаем отделение грунта от стенки устоя в процессе промерзания—оттаивания. Механизм отслоения грунта от конструкций водосбросных и водопропускных сооружений нам представляется следующим. Устой гидротехнических сооружений интенсивно промерзают с наступлением отрицательных температур воздуха. В силу своей специфики они имеют часто сложную конфигурацию и развитую поверхность теплообмена с воздухом и водным потоком. К охлаждаемым поверхностям устремляется влага и замерзает на границе грунт-стенка устоя. В процессе дальнейшего промерзания на этой границе образуется ледяная прослойка, которая как бы отодвигает грунт от стенки устоя. С другой стороны, температурные деформации приводят к объемному сокращению грунта обратной засыпки. Наложение этих двух процессов приводит к отслоению грунта от стенки устоя. Весной, с наступлением положительных значений температуры воздуха, ледяные прослойки вытаивают, грунт за счет температурных деформаций увеличивается в объеме, но на величину меньшую, чем толщина ледяной прослойки. В результате между грунтом и стенкой устоя образуется щель, которая при пропуске воды является путем для контактной фильтрации, приводящая к деформациям сооружений на этом участке.

Для проверки выдвинутых гипотез были проведены комплексные исследования в натуральных и лабораторных условиях.

Натурные исследования проводились на сооружениях Хоробутской системы лиманного орошения на р.Суола в Центральной Якутии. Физическое моделирование процесса отслоения грунта от стенки водопропуска проведено в Центральной инженерной лаборатории Института гляциологии и геокриологии АН КНР.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Комплексные натурные исследования включали следующие виды: динамику физико-механического состава грунта глухой части плотины и устоев (бурение, шурфовка с отбором образцов для анализа на влажность, гранулометрический состав); динамику температурного режима (измерение в геотермических скважинах по общепринятой в геокриологии методике с помощью терморезисторов ММТ-1, ММТ-4); динамику давления грунта на стенку устоя (с помощью датчика давления типа ПДМ-70 — тензорезисторный преобразователь давления); динамику горизонтальных деформаций минеральных частиц грунта (перемещение измерялось с помощью специально сконструированного устройства с вторичным прибором часового типа ИЧ-10); динамику вертикальных деформаций (по специальным маркам с использованием нивелирования второго класса); исследование морозобойного растрескивания и трещин усыхания (инструментальная съемка, шурфовка, фотосъемка, отбор проб) [Zhang, 1996].

В лабораторных условиях был рассмотрен частный случай моделирования тепловых процессов, проходивший при следующих допущениях: материал модели и природы одинаковы; темп промораживания грунта производился в температурных условиях природы; идентичны с натурой были и абсолютные значения температуры наружного воздуха.

Изложенные допущения правомочны, так как в задачу эксперимента входило: а) установление факта образования прослойки льда на границе стенка устоя—грунт; б) проверка прижатия грунта к наклонной поверхности противодиффузионного устройства [Zhang et al., 1996].

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Комплексные исследования Института мерзлотоведения СО РАН на грунтовых плотинах в Якутии гидромелиоративного назначения [Чжан, 1975; Чжан 1981] установили, что в процессе формирования их тепловлажностного режима, они испытывают значительные, по сравнению с естественными поверхностями, градиенты температуры и влажности; сильно иссушаются; грунтовые частицы подвержены дез-

интеграции и переупаковке в грунтовом массиве. При этом следует различать два вида преобразований в теле плотин — макро- (трещины усыхания, морозобойные) и микроструктурные (изменение гранулометрического состава и плотности).

Благодаря процессам иссушения и, возникающим при этом, большим градиентам влажности (до 0,2 долей единиц на метр) и температуры (до 20 град/м) на плотине летом широкое развитие получают трещины усыхания. Глубина проникновения их в тело плотины достигает 1,4 м при глубине протаивания 2,2 м, ширина поверху 3—5 см. Трещины усыхания обеспечивают аэрацию и окисление стенок. Окислительные реакции способствуют цементации частиц, за счет чего грунты хорошо держат вертикальные стенки [Сергеев и др., 1960]. С наступлением холодного

периода года трещины служат путями для поступления воздуха с отрицательными значениями температуры в тело плотины. Эффект этого охлаждения сказывается уже через несколько дней: температура грунта на глубине 2—2,5 м понижается до минус 4—5 °С. В результате резкого охлаждения и промерзания грунтов, летние трещины усыхания углубляются и достигают мерзлых грунтов ядра плотины. При дальнейшем охлаждении промерзшего грунта по этим трещинам развиваются морозобойные трещины.

Доказано [Конищев, 1962], что в условиях сезонного промерзания-оттаивания трещины усыхания предопределяют возникновение различных микроструктурных преобразований грунта. Это хорошо прослеживается в изменении гранулометрического состава грунта тела плотин. Фактические данные, приведенные в работе

Таблица 1. Динамика влажности и объемного веса грунтов правого устоя водосброса Хоробутской системы лиманного орошения

Глубина, м	8.08. 89 г.		1.09. 91 г.		11.04. 92 г.		13. 08. 93 г.	
	W, %	γ, г/см <sup>3</sup>	0,5 м от стенки		0,5 м от стенки	2,5 м от стенки	0,5 от стенки	
			W, %	γ, г/см <sup>3</sup>	W, %	W, %	W, %	γ, г/см <sup>3</sup>
0,1							6,3	1,09
0,5							11,5	1,80
1,0	11,9	—	9,7	1,7	11,2	12,4	9,8	1,65
1,5							10,3	1,75
2,0			17,3	2,1	18,0	13,0	17,4	1,95
2,5							17,3	1,99
3,0	13,3	2,0	19,8	2,1	21,6	14,4	16,1	1,95
3,5							15,1	1,85
4,0			17,4	2,0	16,5	16,3	13,1	1,93
4,5							16,0	1,77
5,0	14,9	1,95				22,2		
6,0						24,7		
10,0	23,6	1,85						
15,0	24,7	1,85						

Таблица 2. Влажность и объемный вес грунта правого устоя водосброса Хоробутской системы лиманного орошения. Шурф со стороны нижнего бьефа (по данным на 10.10.93 г.)

Глубина, м	Расстояние от стенки устоя, м	Влажность, м	Объемный вес влажного грунта, т/м <sup>3</sup>	Объемный вес скелета грунта, т/м <sup>3</sup>	Примечания
0,2	0	12,8			Грунт мерзлый супесчано-суглинистый
	0,1	11,7	1,82	1,63	
	0,2	11,4	1,92	1,73	
	0,4	10,7	2,04	1,85	
	0,6	14,5	2,14	1,87	
0,4	0	15,9	1,86	1,61	То же
	0,1	11,7	2,04	1,82	
	0,2	10,0	1,85	1,68	
	0,4	9,9	1,99	1,82	
	0,6	11,4	2,0	1,80	
0,6	0	10,9	1,56	1,37	«
	0,1	14,8	1,84	1,62	
	0,2	10,8	1,83	1,66	
	0,6	10,3	1,96	1,79	
1,0	0	11,3	1,47	1,32	Грунт мерзлый—песок
	0,1	9,9	1,69	1,54	
	0,2	11,8	1,83	1,63	
	0,6	14,2	2,09	1,83	

[Чжан, 1981], свидетельствуют о том, что в результате сравнительно небольшого (всего 6) цикла промерзания-оттаивания в плотинах происходит дробление песчаных частиц крупнее 0,1 мм и накопление мелкозема, частиц размером 0,05—0,01 мм. Механизм этого процесса подробно описан в трудах [Полтев, 1966; Ребиндер, 1951; Конищев, 1973; Конищев, 1977; Ершов и др., 1973].

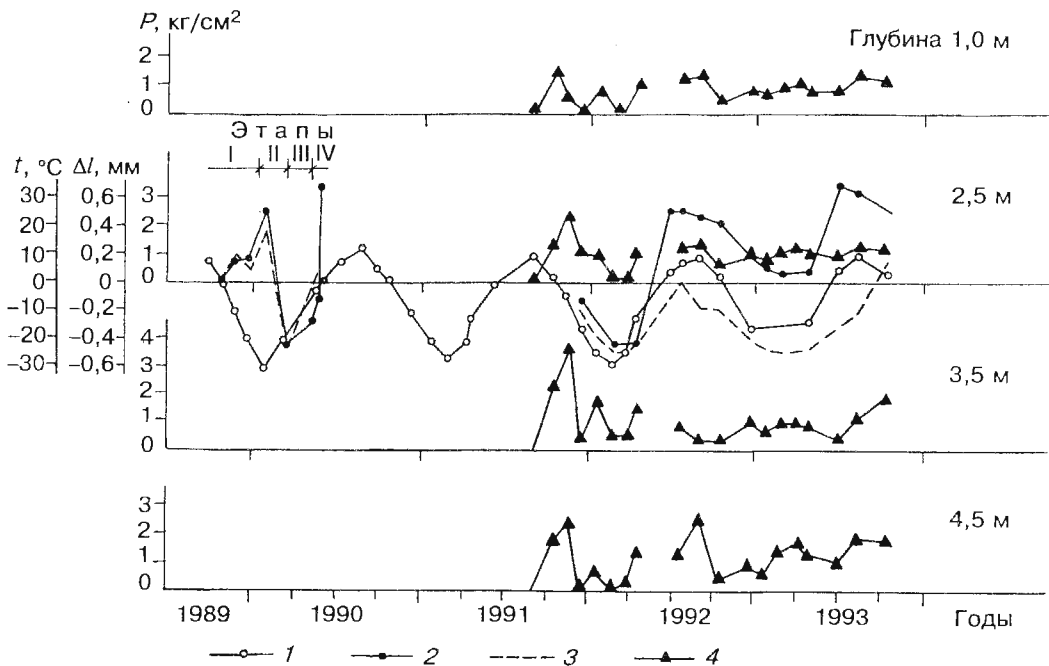
Результатом вышеописанных процессов, происходящих в грунтовых плотинах, являются изменения физических параметров грунта. Так, за шесть лет эксплуатации грунтовой плотины Хоробутской системы лиманного орошения произошло разуплотнение грунта на глубине 0,1 м от 1,7 г/см<sup>3</sup> до 1,5 г/см<sup>3</sup>, а на глубине 0,4 м от 1,9 г/см<sup>3</sup> до 1,7 г/см<sup>3</sup>. Таким образом, дезинтеграция песчаных грунтов способствовала развитию трещин усыхания, как первичных и морозобойных трещин, так и вторичных.

Большой интерес представляет и пространственное распределение влажности и плотности грунта. В табл. 1 и 2 представлены натурные наблюдения за динамикой влажности и объемной массой грунта обратной засыпки железобетонного водосброса Хоробутской системы лиманного орошения на р. Суоле в Республике Саха (Якутия). Следует сразу же отметить, что процесс формирования тепловлажностного режима сооружения не завершен и приведенные данные

носят промежуточный характер. По этим данным можно судить пока что только о наметившейся тенденции отмеченных процессов.

Средняя влажность грунта до глубины 5 м составляет 13,4%, объемная масса 1,96 г/см<sup>3</sup>. Грунты основания с глубины от 6 до 15 м имеют характерную для створа плотины влажность многолетнемерзлых грунтов 24% с объемной массой 1,85 г/см<sup>3</sup>. Несколько повышенные значения объемной массы грунта объясняются наличием включений гравелисто-щебнистых разностей. Уловить какую-либо четкую закономерность влажности грунта не представляется возможным, за исключением пристенного слоя (см. табл. 2). И тем не менее, в целом, с учетом уровенного режима пропуска воды через водосброс и процессов промерзания-оттаивания грунта, с определенной долей допущения можно констатировать следующее. За три года эксплуатации водосброса в интервале глубин 1—2 м в полуметре от стенки произошло увеличение влажности на 7—8%. Начиная с четвертого года, наметилась тенденция к снижению влажности. На глубине 5—6 м в результате наличия постоянного источника влаги (фильтрационного потока в слое сезонного оттаивания) произошло увеличение влаги с 15% до 24%.

Что касается переупаковки минеральных частиц, то на расстоянии 0,5—0,8 м от стенки



Динамика деформаций и давления грунта за стенкой устоя.

1 — температура грунта в месте установки датчиков деформаций; 2 — деформации грунта на расстоянии 40 см от стенки устоя; 3 — то же на расстоянии 15 см; 4 — давление грунта на стенку;  $P$ , кг/см<sup>2</sup> — давление;  $t$ , °C — температура;  $\Delta l$ , мм — деформация.

наметилась тенденция к разуплотнению грунта по всей высоте устоя.

Исследования деформации грунта и давления, которое он оказывает на стенки устоя водосброса показали, что наиболее активно, как и следовало ожидать, процессы протекают в первые годы формирования тепловлажностного режима. Динамика деформаций и давления грунта в устье железобетонного водосброса Хоробутской системы лиманного орошения на р. Суоле показана на рисунке. По активности процесса в первый год эксплуатации условно выделено четыре временных этапа: первый с октября до начала января; второй с января до середины марта; третий с середины марта до начала мая и четвертый с середины мая до конца сентября.

Первый этап характеризуется движением минеральных частиц к стенке за счет замерзания свободной влаги, приводящей к увеличению объема грунта. Датчики фиксируют в это время увеличение давления от 0 до 2,3—3,6 кг/см<sup>2</sup>. На втором этапе в результате глубокого охлаждения грунта (до -30 °С) замерзает оставшаяся свободная вода и часть незамерзшей влаги, это вызвало резкое увеличение объема грунта и дальнейшее перемещение частиц к стенке устоя. Одновременно, глубокое охлаждение грунта приводит к объемному сокращению минеральных частиц. Эти деформации постепенно накапливались и в конце февраля—начале марта привели к отрыву грунта от стенки устоя. Давление грунта на устой в этот момент упало до нуля. Третий этап, когда температура грунта повышается от -30 до 0 °С, характеризуется движением частиц к стенке устоя, обусловленное температурными деформациями минеральных частиц грунта. И наконец, на четвертом этапе, в конце мая месяца, когда температура грунта повысилась до положительных значений и началась контурная фильтрация в устоях, наблюдения были прерваны.

Максимальное перемещение минеральных частиц в первую зиму составило 2 мм. Спустя год, датчики были восстановлены и наблюдения были продолжены, они свидетельствуют о том, что грунт „дышит“, совершая колебательные перемещения от сезона к сезону. Давление при этом четко реагирует на деформации грунта. Вплоть до четвертого года эксплуатации процессы были настолько интенсивны, что давление в критические периоды года падало до нуля. Начиная с пятого года, давление стабилизировалось как по высоте устоя, так и во времени. Среднее значение давления грунта по высоте устоя составило 0,12 МПа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выдвинутая Институтом мерзловедения СО РАН гипотеза возникновения специфических

видов деформаций, являющихся в большинстве случаев причинами крупных деформаций и аварий сооружений, получила подтверждение в натурных и лабораторных экспериментах. Впервые получены в натурных условиях значения деформаций и давления грунта, оказываемое на стенки устоев водопропускных сооружений, которые для данных мерзлотно-климатических условий можно использовать при проектировании. На основе исследований предложено инженерное решение сопрягающего устоя, на которое получено авторское свидетельство [Чжан, Мелкозеров, 1991]. Данное решение внедрено на сооружениях двух мелиоративных систем в Якутии.

## Литература

- Биянов Г.Ф. Плотины на вечной мерзлоте. М., Изд-во Энергия, 1975, 184 с.
- Ершов Э.Д., Иващенко И.Н., Захаров М.Н. и др., Влияние процесса сублимации льда на физико-механические свойства мерзлых пород // Мерзлотные исследования, вып. XIII. М., Изд-во МГУ, 1973, с. 172—175.
- Конищев В.Н. Некоторые особенности покровных суглинков Юго-Восточной части Большеземельской тундры в связи с их генезисом // Вопросы географического мерзловедения перигляциальной морфологии. М., Изд-во МГУ, 1962, с. 131—140.
- Конищев В.Н. Криогенное выветривание. II МК по мерзловедению // Докл. и сообщ., вып. 3, Якуткнигоиздат, 1973, с. 38—45.
- Конищев В.Н. Общие закономерности криогенной дезинтеграции минералов // Мерзлые породы и снежный покров. М., Изд-во Недра, 1977, с. 3—16.
- Полтев Н.Ф. Изменение гранулометрического состава песчаных грунтов при воздействии на них растворов электролитов и процесса замерзания-оттаивания // Мерзлотные исследования, вып. 6. Изд-во МГУ, 1966, с. 199—206.
- Рибиндер П.А., Лотгинов Г.И. Новые физико-химические пути в технологии строительных материалов // Вестник АН СССР, 1951, № 10, с. 47—54.
- Сергеев Е.М., Минервин А.В. Сущность процесса обледенения в подзольной зоне // Вестник МГУ, сер. IV, Геология, № 3, 1960, с. 3—14.
- Тимофеевичук В.С. Деформации земляных плотин талого типа на вечномерзлых грунтах // Кольма, 1960, № 8, с. 40—42.
- Хомзе В.А. Особенности проектирования и строительства низконапорных земляных плотин на вечномерзлых грунтах // Тр. IV совещания-семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях. Т. X, Воркута, 1966, секция гидротехнических сооружений. Красноярск, 1966, 22 с.
- Чжан Р.В. Водно-тепловой режим земляных плотин лиманного назначения // Тр. Якутского НИИ сельского хозяйства. Вып. XII, Якутск, 1972, с. 93—101.
- Чжан Р.В. Температурный режим низконапорных земляных плотин для лиманного орошения в условиях Центральной Якутии // Тр. координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 101. Гидротехническое строительство в районах Крайнего Севера. Л., 1975, с. 79—85.
- Чжан Р.В. Некоторые особенности деформаций земляных плотин низкого напора в условиях вечной мерзлоты // Научные основы мелиорации земель при создании территориально-производственных комплексов в Сибири. Красноярск, 1980, с. 97—98.
- Чжан Р.В. Динамика влажности грунтов низконапорных плотин в условиях вечной мерзлоты // Инженерные иссле-

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН

дования мерзлых грунтов. Новосибирск, Наука, 1981, с. 117—121.

**Чжан Р.В.** Изменения физико-механических свойств промерзающих и протаивающих дисперсных грунтов в плотинах низкого напора // Исследование состава, строения и свойств мерзлых, промерзающих и оттаивающих пород с целью наиболее рационального проектирования и строительства. М., 1981, с. 115—117.

**Чжан Р.В., Мелкозеров Г.В.** Сопрягающий устой. Приоритет изобретения 30.01.90 г. А.С. № 1705479. За-регистрировано в Государственном реестре изобретений Со-юза ССР 15.09.91 г.

**Чжан Р.В.** Обеспечение устойчивости гидротехнических со-оружений водохозяйственного назначения в Якутии // Нау-ка и образование, 1997, № 1, с. 139—140.

**Zhang R.V.** Field studies of the dynamics of temperature regime? pressure and soil deformations around the reinforced concrete spillway under central Yakutia conditions // International symposium: Cold regions engineering. Harbin, China, 1996, p. 22—24.

**Zhang R.V., Zhu Linnan, Zhang Changqing.** A physical model study on the Interaction between aqueducts and freezing, thawing and frozen soils. In the same place, 1996, p. 27—29.

*Поступила в редакцию  
12 июля 1997 г.*