

СТРОИТЕЛЬСТВО ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ (Проблемы и особенности обеспечения их устойчивости)

Р. В. Чжан, директор Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

В жизни человека вода нужна для самых разнообразных целей: для водоснабжения, транспорта, орошения земель и т.д. Совокупность мероприятий, направленных на использование водных ресурсов, составляет отрасль хозяйственной деятельности, называемую водным хозяйством. Использование водных ресурсов рек обычно затруднено тем, что величина их стока неравномерна в течение года. Во время засух по некоторым рекам почти полностью прекращается сток, а в увлажненные периоды, особенно в половодье, огромные массы воды протекают бесполезно, вызывая наводнения, приносящие беды людям и причиняющие огромный вред природно-техническим комплексам. Сознательное вмешательство человека в естественный режим рек для использования их водных ресурсов путем строительства различных инженерных сооружений требует большой осторожности. Искусственное изменение гидравлики рек может быть как во благо, так и во вред для людей и ландшафтов. Негативные последствия выражаются в подтоплении селитебных территорий, разрушении берегов рек и водоемов и т.п. Эти искусственные сооружения называются гидротехническими, а изучающая их наука – гидротехникой. Обычно комплекс гидротехнических сооружений образует гидроузел, который включает: плотину, водохранилище, водосброс, водозабор, подводящие и отводящие каналы, здание ГЭС, а при ирригации – сеть каналов, акведуков, трубопроводов и др.



Вид с верхнего бьефа на головной железобетонный водосброс на р. Суола.

Начало гидротехнического строительства в области развития многолетнемерзлых пород можно отнести к концу XVIII – началу XIX вв. [1, 2]. К началу нынешнего века на территории криолитозоны России было построено свыше 800 низконапорных гидроузлов, в том числе более 400 – в Якутии. Первые сведения о строительстве гидротехнических сооружений в Якутии относятся к началу XIX в. В Олекминском улусе были построены оросительные системы для полива зерновых культур [3], а в Алданском улусе на р. Олом – плотина для орошения лугов [4]. Бурное развитие гидротехнического строительства в Республике Саха (Якутия) началось в период интенсивного промышленного освоения ее территории – конце 50-х – начале 60-х годов прошлого столетия. Тогда возводились гидротехнические сооружения энергетического, водохозяйственного и мелиоративного назначения [5 – 8]. Кроме того, в большом количестве строились невысокие глухие дамбы на горнодобывающих предприятиях [9].

Все гидротехнические сооружения в той или иной мере подвержены деформациям. Анализ работы гидроузлов промышленного и питьевого водоснабжения свидетельствует о том, что более 40% отказов происходит из-за нарушения температурного режима сооружений. Причем в первые три года эксплуатации случалось до 53% отказов, между тремя и пятью годами – 31%, в последующие годы – остальные [10]. До 90% низконапорных гидроузлов мелиоративного назначения в Якутии по вышеуказанной причине разрушались в первый год эксплуатации [11].

Как правило, разрушения гидроузлов происходят в местах расположения водопропускных сооружений. Если вне области распространения многолетней мерзлоты по этой причине выходят из строя 50% сооружений [12], то в криолитозоне – 70% [13]. Следовательно, изучение и прогноз взаимодействия водопропускных сооружений с окружающей средой приобретают особое значение в криолитозоне, где развитие криогенных процессов вызывает специфические виды деформаций устоев [14].

Опыт строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений показал необходимость широкомасштабных исследований прочностных, деформационных и фильтрационных свойств льда, мерзлых, промерзающих-протаивающих и талых грунтов, а также искусственных грунтовых образований, например, ледогрунтовых, цементно-грунтовых и других смесей. Эти исследования позволили подойти к разработке методов прогноза сложного термонапряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений.

Одновременно развивались методы мелиорации мерзлых грунтов. Это направление возникло в связи с тяжелыми условиями производства строительных работ и эксплуатации гидротехнических сооружений в криолитозоне. Решение вопросов летней и зимней укладки грунта в тело плотины, а также защита ее гребня и низового откоса от воздействия высоких температурно-влажностных градиентов, приводящих к нарушению сплошности грунтового массива, потребовали проведения больших экспериментальных работ в лабораторных и натурных условиях. Одновременно разрабатывались способы обеспечения водонепроницаемости плотин с использованием негрунтовых материалов.

В 1937 г. Е.В. Близняк сформулировал принципы строительства плотин в криолитозоне по их тепловому состоянию. Он ввел понятия «мерзлая» и «талая» плотина [15]. В последующем В.С. Тимофеев предложил классификацию гидросооружений и принципы строительства [16]. Однако инженеры еще долгое время дискутировали по этому вопросу, пока строительные нормы и правила СНиП 2.06.05-84* [17] не определили два основных принципа строительства гидротехнических сооружений. Первый принцип предполагает, что фильтрационная и статическая устойчивость плотины и ее основания обеспечивается мерзлыми грунтами, а второй принцип – талыми.



Хоробутская мелиоративная система в Мегино-Кангаласском улусе РС(Я). Головной железобетонный водосброс на р. Суола – вид с верхнего бьефа.

Исходя из принципов строительства и эксплуатации определились типы плотин: «мерзлая», «талая» и «гало-мерзлая». Кроме этого, Р.В. Чжаном выделен еще один тип плотин – сезоннопромерзающие-оттаивающие [11]. Это плотины сезонного действия, противодиффузионная устойчивость которых обеспечивается только в период весеннего паводка слоем грунта, промерзшего зимой.

Особое значение для прогноза устойчивости гидроузлов в криолитозоне приобретают расчеты их температурного режима и напряженно-деформированного состояния. Расчет температурных полей грунтовых плотин сводится к решению системы дифференциальных уравнений теплопроводности при заданных условиях однозначности. Различают нестационарный и стационарный температурные режимы плотин и их оснований. Существуют различные методы решения системы дифференциальных уравнений при конкретных условиях однозначности: графический, графоаналитический, аналитический, а также используются методы физического и математического моделирования.

Расчет напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин с учетом активизации криогенных процессов – чрезвычайно сложная задача. Существующий метод основан на совместном решении задач теплопроводности и упругости в рамках несвязанной задачи термоупругости [18]. Естественно, что он является приближенным для таких сложных грунтовых систем. Однако он более корректен, чем решение тепловых задач без рассмотрения напряженно-деформированного состояния или решения механических задач без учета терморезима, т.е. метод учитывает одновременно тепловые и механические процессы в плотинах. Решение этих сложных нелинейных дифференциальных уравнений осуществляется способом конечных элементов с применением компьютерного моделирования. Задача значительно усложняется при наличии в теле плотины водопропускного сооружения.

В основе устойчивости грунтовых плотин лежат физико-механические свойства грунтов, которые находятся в зависимости от тепловлажностного режима сооружения. Как показали натурные исследования, изменение параметров грунтов в процессе строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений должно учитываться при их проектировании.



Мелиоративная система в бывшем колхозе им. Байкалова в Мегино-Кангаласском улусе РС(Я). Деревянный ряжевый водосброс, построенный в 1936 г. инженером А. Шестаковым. Система работала более 50 лет, была искусственно разрушена в 1986 г.

Имея развитую поверхность теплообмена, плотины находятся под действием высоких тепловлажностных градиентов (до 10 град/м зимой и 20 град/м летом), большой амплитуды годовых колебаний температуры (до 500 С) и влажности (до 15%), причем перераспределение влаги идет в течение всего года. Исследования показали, что влажность грунтов низконапорных плотин в установившемся тепловлажностном режиме в условиях Центральной Якутии в среднем равна 17 – 18%. Однако за счет большого дефицита влажности воздуха верхние слои подвержены иссушению до 5 – 10%. Как свидетельствуют результаты натурных исследований Института мерзлотоведения СО РАН, сильное иссушение верхнего горизонта плотин сказывается на прочностных, фильтрационных и теплофизических свойствах грунтов. В летний период, например, плотины покрываются трещинами усыхания, достигающими к концу теплого сезона значительных глубин. Зимой же эти трещины углубляются в результате морозобойного растрескивания [14]. В грунтовых плотинах, наряду с макроструктурными изменениями (морозобойные трещины, трещины усыхания), происходят микроструктурные преобразования, выражающиеся в изменении гранулометрического состава, объемного веса, влажности и других физико-механических параметров грунтов. Так, исследование гранулометрического состава грунтов плотины № 3 Хоробутской мелиоративной системы в Центральной Якутии показало, что в результате только четырехлетних криогенных циклов промерзания-оттаивания произошло дробление песчаных частиц крупнее 0,1 мм и накопление частиц размером 0,05 – 0,01 мм.

В плотинах водохозяйственного назначения, имеющих водохранилища сезонного регулирования, для быстрого создания мерзлого противофильтрационного ядра (за одну зиму) широко используются термосифоны, а также термосифоны в сочетании с теплогидроизоляционными покрытиями плотин. Однако с помощью термосифонов пока удалось проморозить массив талых пород только до глубины 20 – 30 м (Западная Якутия). В этой связи Институтом мерзлотоведения СО РАН был предложен «тало-мерзлый» тип сооружений, который включен в СНиП 2.06.05-84*. В этом случае не промороженная талая зона, существующая в основании плотины, находится в тепловом равновесии с замораживающей системой и окружающей средой, при этом фильтрационные расходы находятся в допустимых проектных пределах. Эта идея была поддержана и блестяще подтверждена экспериментально Г.И. Кузнецовым при обосновании конструкций дамб накопителей промышленных отходов в криолитозоне [19].

Несмотря на то, что термосифоны нашли широкое применение в строительстве, существовало мнение, что они не эффективны якобы из-за возникающей в них конвекции теплоносителя летом. Решение этого вопроса потребовало постановки натурального эксперимента. При внедрении термосифонов в гидромелиоративную практику в Центральной Якутии экспериментально было установлено, что летней конвекции в жидкостных термосифонах ниже слоя сезонного оттаивания грунтов не происходит [14]. В то же время работа термосифонов в сочетании с теплоизоляцией на поверхности плотин более чем в 3 раза уменьшает глубину сезонного оттаивания грунтовых плотин.

Наибольшую опасность для устойчивости грунтовых плотин представляют вертикальные морозобойные трещины, ориентированные перпендикулярно продольной оси плотины. В случае, если глубина трещин оказывается ниже нормально подпертого уровня (НПУ), то по ним возможна фильтрация воды и размыв плотины.

Натурные исследования и математическое моделирование позволили рекомендовать для обеспечения устойчивого теплового режима грунтовых плотин применение теплоизоляционных покрытий в сочетании с искусственным охлаждением тела и основания, а для борьбы с криогенным растрескиванием – покрытие тела плотины материалом, обладающим малым коэффициентом температурных деформаций (щебень, гравийно-песчаная смесь) [20].

Институтом мерзлотоведения СО РАН изучены геокриологические процессы, происходящие в грунтах обратной засыпки устоев водопропусков, при тепловом и механическом взаимодействии сооружений с окружающей средой. Эти исследования позволили выявить причины возникновения разрушающих деформаций и разработать предложения по обеспечению их устойчивости. Изучались водопропуски следующих конструкций: деревянные – ряжевые и сточно-обшивные; железобетонные – открытого и закрытого типа из монолита и сборные; металлические – прямоточные и сифонного типа.

Натурные исследования были проведены на сооружениях Хоробутской системы лиманного орошения. В их состав входили:

- наблюдения за динамикой температурно-влажностного режима грунтов вокруг водопропуска в сезонном и многолетнем циклах;
- исследование изменения физико-механических свойств грунтов в устоях в процессе многолетних циклов промерзания-оттаивания;

– изучение механического воздействия грунтов обратной засыпки на стенки устоя водопропуска при промерзании-оттаивании грунтов в годичном и многолетних циклах.

По результатам проведенных наблюдений была прослежена динамика температурного режима в годичном и многолетнем циклах, что позволило обосновать заделку противотрационного устройства в основании флютбета* и разработать оптимальные конструкции водопропускных сооружений при тало-мерзлом состоянии сооружений гидроузла по напорному фронту.

Определенный интерес представляет динамика влажности грунтов в устоях водопропускных сооружений гидроузлов. Установлено, что в процессе их эксплуатации происходит перераспределение влажности: накопление льда на границе «стенка – грунт» и уменьшение влажности в периферийной зоне.

Механизм отслоения грунтов от конструкций водо-пропускных сооружений следующий [14]. Устои водопропускных сооружений имеют сложную конфигурацию и развитую поверхность теплообмена с окружающей средой. С наступлением холодов они интенсивно промерзают и охлаждаются. Содержащаяся в грунтах обратной засыпки устоя влага мигрирует к охлажденным поверхностям и замерзает на границе «грунт – стенка устоя». В процессе промерзания и дальнейшего охлаждения на этой границе скапливается значительное количество льда, который как бы отодвигает грунт от стенки устоя. С другой стороны, в массиве грунта развиваются температурные деформации, приводящие к его объемному сжатию. Весной ледяные прослойки вытравиваются, объем грунта за счет температурных деформаций увеличивается, но на меньшую величину, чем толщина ледяной прослойки. В результате между грунтом и стенкой образуется щель, которая при пропуске воды является путем для контактной фильтрации, приводящей к деформациям водопропускного сооружения и плотины на этом участке гидроузла.

Инструментально доказано [14], что горизонтальные перемещения частиц грунта в устое носят циклический характер. Он обусловлен замерзанием свободной и связанной влаги, а также линейными деформациями минеральных частиц за счет температурных перепадов. Частицы грунта, переместившись в сторону тела плотины от стенки устоя, не возвращаются в исходное положение. Этот факт является свидетельством отслоения грунта от стенки устоя. Следует иметь в виду, что в последующие годы формируемая щель может заполняться натечным грунтом, тогда данный процесс повторяется.

Исследование динамики физико-механических параметров грунтов обратной засыпки устоев показало существование разуплотненных зон. Эти зоны, как оказалось впоследствии, явились местом образования морозобойных трещин, разбивающих массив на полигоны, размеры которых соизмеримы с габаритами сооружения.

Таким образом, нами впервые экспериментально в лабораторных и натурных условиях было доказано явление отслоения грунта от стенки устоя в процессе промерзания, охлаждения и оттаивания, позволившее вскрыть причину потери устойчивости водопропусков [14].

Эти исследования легли в основу математического моделирования термонапряженного состояния устоев для решения следующих задач:

- определение возможного давления, оказываемого на стенку устоя при пучении промерзающих грунтов;
- расчет термонапряженно-деформированного состояния грунтового массива за стенкой устоя;

– оценка возможности криогенного растрескивания грунтов и размеров образуемой щели между грунтом и стенкой устоя;

– расчет максимальных температурных напряжений при отрыве грунтов от стенки устоя водопропуска.

Проведенные Институтом мерзлотоведения СО РАН многолетние натурные исследования, физическое и математическое моделирование позволили установить механизм деформирования водопропусков на контакте его с телом грунтовой плотины, а также установить факт существования разуплотненных зон в грунтовом массиве устоя водопропусков, которые способствуют морозобойному растрескиванию грунтов.



Хоробутская мелиоративная система в Мегино-Кангаласском улусе РС(Я). Деревянный шлюз-регулятор № 4 стоечно-обшивной конструкции, разрушенный паводком в 1971 г.

На основании комплексных исследований нами была предложена конструкция сопрягающего устоя и даны рекомендации по повышению надежности водо-пропусков, используемых в практике строительства [19].

Гидротехнические сооружения относятся к категории наиболее сложных технических систем. Поэтому контроль их состояния в процессе строительства и эксплуатации является обязательным. В настоящее время под угрозой полного выхода из строя находятся все водохозяйственные объекты Якутии. Это вызвано тем, что многие гидротехнические сооружения брошены на произвол судьбы в связи с закрытием крупных горно-обогатительных комбинатов, ликвидацией министерств и ведомств водохозяйственного строительства, где были сосредоточены специализированные эксплуатационные службы. Организация и проведение мониторинга на гидротехнических сооружениях республики должны быть восстановлены. Это

позволит получать необходимый объем информации, на основе которой могут решаться следующие основные задачи:

- оценка состояния сооружений и разработка необходимых и своевременных мер по обеспечению их устойчивости;
- исследование динамики физических и механических параметров сооружений и прогноз их изменений в процессе эксплуатации;
- оценка воздействия гидроузлов на окружающую среду;
- совершенствование нормативно-методической базы для оптимального проектирования и эксплуатации гидросооружений.

В криолитозоне каждая плотина по своей сути является уникальной. Их конструкции и условия работы могут быть сходными, но никогда не бывают одинаковыми. Поэтому организация наблюдений за работой сооружений должна носить исследовательский характер и не сводиться только к комплексу стандартных наблюдений. Наши исследования показали, что строительные свойства грунтов в процессе эксплуатации низконапорных гидроузлов могут изменяться на протяжении длительного периода, который соизмерим иногда со сроками существования сооружений, при этом изменяется схема статической работы сооружения и его основания.

В условиях криолитозоны мониторинг на гидроузлах должен носить комплексный характер. Состав, объем и сроки проведения наблюдений зависят от класса сооружений, его конструкции, инженерно-геологических и мерзлотных условий. В состав этих наблюдений должны входить:

- контроль изменения геокриологических и гидрогеологических условий;
- геотермические наблюдения за формированием температурного режима плотины, ее основания, береговых примыканий, зон сопряжения с водосбросом, берегов и ложа водохранилища;
- фильтрационные – в теле и основании плотины, в зоне водосбросов и в береговых примыканиях плотины;
- гидротермические – в приплотинной зоне водохранилища, включая поверхность подводного откоса и береговых склонов на участке примыкания к ним плотины;
- гидрогеологические исследования режима надмерзлотных вод в слое сезонного оттаивания и грунтовых вод подрусовых таликов в зоне сооружений гидроузла;
- контроль сезонного промерзания-оттаивания гребня и низового откоса плотины;
- геодезические наблюдения за осадками тела плотины и водосбросов, переработкой берегов.

В периоды возведения и эксплуатации сооружений должны быть установлены параметры следующих важнейших процессов, определяющих их устойчивость:

- термический, ледовый и гидрологический режимы водохранилища;
- динамика формирования температурно-влажностного режима сооружений и их оснований;

- локальные особенности температурного режима грунтов в зоне естественного подруслового талика, водосбросных и водозаборных сооружений, а также на береговых участках водохранилища с неблагоприятными мерзлотно-грунтовыми условиями (например, при наличии проявлений термокарста, солифлюкции, наледей, морозного пучения и трещинообразования);
- развитие криогенных процессов.



*Пригород г. Якутска. Железобетонный шлюз-регулятор на р. Шестаковке:
а – вид с верхнего бьефа, б – с нижнего.*

Успех мониторинга возможен только при совершенствовании контрольно-измерительной аппаратуры, методов измерений и обработки информации. Его, безусловно, нужно проводить с помощью автоматизированных систем, которые должны быть самонастраивающимися и изменяться во времени применительно к решению новых задач и проблем, возникающих в процессе эксплуатации сооружений.

Исследования работы гидротехнических сооружений в районах распространения многолетнемерзлых пород показали сложность возведения и эксплуатации их в этих суровых условиях. Изменение климата в сторону потепления привело в последние годы к увеличению стока поверхностных и грунтовых вод за счет как выпадающих атмосферных осадков, так и таяния ледников и многолетнемерзлых пород. Участились паводки на реках Якутии, приносящие большой ущерб народному хозяйству.

Бороться с катастрофическими паводками сложно, а в ряде случаев просто невозможно. Известно, что гидроузлы рассчитываются на процент обеспеченности речного стока, который определяется из фактических наблюдений за многолетний период. Это касается только одной части расчетов – гидравлических. Но для успешной работы гидроузлов необходим целый комплекс специальных расчетов, в частности инженерно-геокриологических, которые учитывают специфику поведения мерзлых, промерзающих – протаивающих грунтов сооружений и их оснований.

По мере накопления опыта строительства и эксплуатации гидросооружений, а также специальных научных знаний, отражающих геокриологические особенности их работы, ученые и специалисты пришли к выводу, что существующие нормативные документы по проектированию, строительству и эксплуатации требуют значительной корректировки. В связи с этим в настоящее время совершенно правильно принято решение о составлении

территориальных строительных норм (ТСН), которые будут учитывать региональные особенности строительных площадок. Правильность данного шага подтверждает инженерная и научная общественность страны, которая отмечает это на своих научно-практических форумах.

В 2008 г. Министерство строительства и архитектуры Республики Саха (Якутия) поручило Институту мерзлотоведения СО РАН начать составление Территориальных строительных норм по проектированию, строительству и эксплуатации низконапорных гидроузлов в Якутии. Подобный документ, безусловно, повысит качество проектирования, строительства гидросооружений этого класса и, как следствие, – их устойчивость.

Литература

1. Богословский П.А. О строительстве земляных плотин в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Труды Горьковского инж.-строительного института им. В.П. Чкалова, 1958. – Вып. 29. – С. 3–34.
2. Цветкова С.Т. Опыт строительства плотин в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Материалы к основам учения о мерзлых зонах земной коры. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Вып. VI. – С. 87–110.
3. Майнов И.И. Русские крестьяне и оседлые иногородцы в Якутской области. – С.-Петербург, 1912. – 386 с.
4. Афанасьев П. Опыт сооружения в Якутском округе на р. Олом оросительной плотины // Приложения к газете «Якутская окраина». – Якутск, 1913. – № 59. – 6 с.
5. Биянов Г.Ф. Плотины на вечной мерзлоте. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
6. Слоев Л.Н. Вопросы проектирования водозаборных узлов лиманного орошения в Центральной Якутии. – Якутск: Якутское кн. изд-во, 1968. – 112 с.
7. Лысканов Г.А. Опыт строительства плотин мерзлого типа в Якутии. – Якутск: Якутское кн. изд-во, 1964. – 63 с.
8. Чжан Р.В. Грунтовые плотины Якутии. – Якутск, 1983. – 62 .
9. Иларов Н.А. Работа водосбросных сооружений гидроузлов малого напора в условиях Якутии // Водо-пропускные сооружения в условиях Крайнего Севера. – Якутск: Изд-во ЯГУ, 1985. – С. 3–18.
10. Придорогин В.М. Надежность грунтовых сооружений, возводимых в северной строительноклиматической зоне // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Гидротехническое строительство в районах вечной мерзлоты и сурового климата. – Л.: Энергия Л.О., 1979. – С. 8–12.
11. Чжан Р.В. Исследование теплового режима низконапорных земляных плотин лиманного орошения в условиях Центральной Якутии: Автореферат дисс. канд. техн. наук. – М., 1977. – 23 с.
12. Барабанова С.Е. Случаи повреждений гидротехнических сооружений и меры по обеспечению безопасности // Гидротехническое строительство. – 1995. – № 3. – С. 24–27.

13. Белан В.И., Придорогин В.М. Классификация отказов плотин из грунтовых материалов, построенных в северной строительной-климатической зоне // *Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Гидротехническое строительство в районах вечной мерзлоты и сурового климата.* – Л.: Энергия, 1979. – С. 64–68.
14. Чжан Р.В. Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. – 207 с.
15. Близняк Е.В. О проектировании и строительстве плотин в условиях вечной мерзлоты // *Гидротехническое строительство.* – 1937. – № 9. – С. 14–16.
16. Тимофейчук В.С. Классификация гидросооружений в районе вечной мерзлоты и принципы строительства // *Известия вузов. Строительство и архитектура.* – 1977. – № 10. – С. 99–103.
17. СНиП 2.06.05-84*. Плотины из грунтовых материалов. – М., 1991. – 49 с.
18. Zhang R. V., Grechishev Thermal – stress state of spillway abutments in permafrost areas. Fourth International Symposium on Permafrost Engineering. 21 – 23 September, Lanzhou, China, 2000 // *Journal of Glaciology and Geocryology.* – Beijing: Science Press, 2000. – Vol. 22. – P. 137–145.
- 19 Кузнецов Г.И. Основы проектирования золоотвалов. – Красноярск, 1998. – 181 с.
20. Чжан Р.В. Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений низкого напора в криолитозоне. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2000. – 160 с.