УДК 627.8:624.139

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН В КРИОЛИТОЗОНЕ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Чжан Р.В.

Институт мерзлотоведения им П.И.Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, e-mail: zhang@mpi.ysn.ru

Рассмотрены существующие на сегодняшний день представления о принципах работы гидротехнических сооружений в криолитозоне. Потепление климата на земле, начавшееся во второй половине прошлого столетия, продолжается и в настоящий период. На этом фоне в особом положении оказались гидротехнические сооружения, расположенные в этих регионах. Они испытывают не только общеклиматический, но и техногенный прессинг, обусловленный дополнительными водно-тепловыми нагрузками от водохранилищ. Показано, что в процессе эксплуатации они часто переходят из мёрзлого в талое состояние и наоборот. Указывается на то, что этот переход нельзя связывать только с современным потеплением климата. Отмечено, что при сложных инженерно-геологических, гидрогеологических, мерзлотных условиях функциональное назначение гидроузла может обеспечиваться только при сохранении определённого теплового состояния, например, только мёрзлого.

Ключевые слова: криолитозона, геокриология, гидроузел, грунтовая плотина, многолетнемёрзлые грунты, тепловлажностный режим

GEOCRYOLODY PRINCIPLES OF EARTH DAMS FOR LOW AND MEDIUM PRESSURES IN PERMAFROST IN A CHANGING CLIMATE

Zhang R.V.

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: zhang@mpi.ysn.ru

This article discusses the current views on the principles of operation of hydroengineering structures in permafrost regions. . Of special concern are hydroengineering structures located on permafrost. They are subject not only to climatic, but also to technogenic pressure caused by additional hydrothermal loads from water reservoirs. This article presents the concept of geocryological monitoring of hydroengineering structures and substantiates its necessity in view of climatic change. It is demonstrated that embankment dams often change their state from frozen to thawed or from thawed to frozen during the operation period. It is shown that these transitions are not always related to the observed climate warming. Where geotechnical, hydrogeological and permafrost conditions are complicated, proper performance of embankment dams can only be provided by adhering to a selected thermal design, for example, a frozen state.

Keyworde: permafrost, geocryology, hydroengineering complex, embankment dam, hydrothermal regime

Как известно, основной доминантой из многочисленных факторов, влияющих на устойчивость грунтовых плотин в криолитозоне, является их температурно-влажностный режим или их геокриологическое состояние. При проектировании принимают один из принципов строительства [17]:

– I принцип строительства предполагает, что вечномерзлые грунты основания сохраняются в мерзлом состоянии при строительстве и эксплуатации, а талые грунты противофильтрационного устройства в плотине и в основании замораживаются до начала заполнения водохранилища и сохраняются в мерзлом состоянии в течение всего периода эксплуатации;

– II принцип строительства допускает использование естественных талых или оттаивание вечномерзлых грунтов основания в ходе строительства и эксплуатации плотины на определенную глубину до начала заполнения водохранилища, с талым противофильтрационным элементом в теле и основании плотины.

Исходя из принципа строительства, определились геокриологические понятия состояния плотин: «мерзлая плотина», «талая плотина» и «тало-мерзлая плотина».

Мерзлая плотина – плотина, водонепроницаемость которой обеспечивается мерзлым состоянием грунтов ее противофильтрационного устройства в теле и основании. То есть по напорному фронту грунты тела и основания образуют сплошной мерзлый противофильтрационный массив. В этом случае отсутствует гидравлическая связь бьефов.

Талая плотина – плотина, в которой противофильтрационную преграду образуют из талых грунтов, позволяющих существовать фильтрационному потоку, обеспечивающему гидравлическую связь бьефов в допустимых пределах, как с точки зрения устойчивости сооружения, так и с точки зрения необходимости сохранения проектных объёмов воды в водохранилище. Грунты противофильтрационного устройства тела и основания, а также части низового клина находятся в талом состоянии.

Тало-мерзлая плотина – плотина, у которой по напорному фронту возводятся участки по I и II принципам. Сопряжение

между талыми и мерзлыми участками гидроузла осуществляется за счет использования охлаждающих устройств. Тало-мёрзлая плотина обеспечивает фильтрационную устойчивость сложным тепловым состоянием грунтов как в поперечном, так и в продольном сечениях.

В поперечном сечении устанавливается такое соотношение мерзлых и талых зон, когда осуществляется устойчивый тепловой баланс между ними, при этом обеспечивается фильтрационная и статическая устойчивость сооружения в целом. Качественно это выглядит так: мёрзлый массив занимает большую часть сечения ядра плотины и низовую упорную призму; талые грунты, как правило, захватывают основание и часть ядра со стороны верхнего бьефа, а также часть низового клина плотины и основания в пределах и ниже дренажного устройства.

В продольном сечении это выглядит как чередование талых и мёрзлых «окон», при этом так же, как и в поперечном сечении, сохраняется устойчивый тепловой баланс. Существует гидравлическая связь бьефов.

Кроме того, нами выделен еще один тип плотины – *сезонно промерзающая протаивающая* [20], [15]. Это плотина сезонного действия, противофильтрационная устойчивость которой в период паводка обеспечивается слоем сезонно промерзшего грунта.

Особенность использования мерзлых грунтов в качестве противофильтрационной преграды в этих плотинах заключается в том, что промороженный сверху за зиму слой грунта полностью не оттаивает к моменту сброса воды с временного водохранилища (лимана), то есть противофильтрационная и статическая устойчивость сооружения обеспечивается сезонно промерзающим грунтом. Поэтому необходимость искусственных приемов по промораживанию этих плотин отпадает.

Таким образом, определяя тип плотины по геокриологическому состоянию, мы исходим из температурно-влажностного режима грунтов ее противофильтрационного устройства в период эксплуатации гидроузла.

Следует отметить, что в нормативной литературе до сих пор нет единого мнения и четкости в отношении принципов строительства гидроузлов в криолитозоне. Так, в рекомендациях [14] однозначно указано «сочетание I и II принципов строительства, а также талой и мерзлой конструкций плотины в одном створе не рекомендуется». В то же время [8] и [17] допускают использование двух принципов строительства по одному напорному фронту. Более того, при наличии глубокого талика под руслами водотоков и мощной толщи сильносжимаемых при оттаивании вечномерзлых грунтов на пойме [8] рекомендует рассматривать возможность строительства плотины комбинированного типа: береговые части выполнять из грунта, а русловую – из бетона на талом основании. При этом грунтовая часть плотины должна быть мерзлого типа. Сопряжение бетонной и грунтовой частей рекомендуется осуществлять с помощью замораживающих систем.

В основе устойчивости плотин мерзлого типа (I принцип) лежат высокие прочностные и водоупорные свойства мерзлых грунтов. Мерзлое состояние тела и основания плотины может создаваться естественным промерзанием и искусственным промораживанием грунтов [2], [3[, [19].

Для плотин с постоянным водохранилищем искусственное промораживание грунтов тела и основания необходимо, так как водохранилище является мощным дополнительным источником тепла, влияющим на тепловое состояние тела и основания плотин. Создание мерзлого ядра в теле плотины может быть достигнуто либо послойным промораживанием тела плотины в зимний период, либо за счет постоянных или сезонно действующих охлаждающих устройств. Обычно это трубчатые системы, по которым циркулирует хладоагент. Охлаждающие системы подразделяются на закрытые и открытые, с принудительной и естественной циркуляцией теплоносителя. В качестве теплоносителя используют: воздух; жидкости – рассолы, керосин; парожидкости – аммиак, фреон и др.

Безусловно, для промораживания плотин эффективно используют и простые приёмы, применяемые ещё в прошлом столетии, такие, как удаление с гребня и низового откоса снега; устройство настилов на низовом откосе, позволяющее исключить контакт снега с поверхностью плотины и обеспечивающее проветривание откоса зимой и отражение солнечных лучей летом; устройство теплоизоляции на гребне и низовом откосе. В последнее время с появлением новых эффективных тепло- и гидроизоляторов, а также приёмов по повышению альбедо выполняется пригрузка гребня и откосов плотин породами, близкими к белому цвету, покраска поверхностей.Используют также сочетание отражателей солнечных лучей с охлаждающими устройствами.

При проектировании и строительстве грунтовых плотин по II принципу требуются определенные мероприятия по защите от промерзания дренажа, гребня и низового откоса. Положительным моментом строительства по II принципу является то, что не нужно соблюдать особых требований при

компоновке плотины с другими сооружениями гидроузла.

Отметим, что I принцип строительства (плотины мерзлого типа) следует принимать при следующих инженерно–геологических и инженерно–геокриологических условиях створа [8]:

– основание сложено сильнольдистыми, сильносжимаемыми при оттаивании грунтами (III категория сжимаемости оттаивающей толщи грунтов, коэффициент оттаивания больше 0,05);

– скорость подруслового потока не превышает $3 \cdot 10^{-5}$ м/с, мощность талика не более 15 м.

II принципу строительства, то есть талому типу плотин, отдается предпочтение при следующих инженерно–геологических условиях створа:

– основание представлено скальными, полускальными, малосжимаемыми при оттаивании нескальными вечномерзлыми грунтами (I и II категории сжимаемости оттаивающей толщи грунтов, коэффициент оттаивания не превышает 0,05);

– в русле водотока имеется глубокий или сквозной талик, а борта и пойма долины сложены грунтами I и II категории сжимаемости при оттаивании.

Таким образом, грунтовые плотины в криолитозоне работают в сложном термонапряженно-гидродинамическом поле.Сохранение квазистабильного состояния, обеспечивающего устойчивость сооружения в целом, представляет сложную инженерную задачу.

Практика эксплуатации гидротехнических сооружений этого класса в суровых климатических и сложных инженерно-геокриологических условиях криолитозоны показала, что нередко они переходят из одного теплового состояния в другое – талые в мёрзлые и мёрзлые в талые.

В тех случаях, когда фильтрация через плотину и основание незначительна или отсутствует, плотины промерзают естественным путем. Это подтверждено также математическим моделированием [19].Примером плотин, промерзших естественным путем в период эксплуатации, может служить ряд плотин водохозяйственного и мелиоративного назначения: на Европейском Севере, в Забайкалье и Якутии, на Северо-Востоке и Магаданской области России [3], [18], [21].Положительным моментом перехода грунтовых плотин из талого состояние в мерзлое является повышение их статической и противофильтрационной устойчивости. Однако процесс формирования этого состояния плотин сопровождается рядом негативных криогенных явлений. Так, промерзание грунтовых противофильтрационных устройств (экрана, ядра) приводит к их растрескиванию, а дренажных – к повышению вероятности возникновения суффозии из–за поднятия напора; гребень и откосы подвержены пучению, а при протаивании – осадкам, солифлюкции, термоэрозии и другим криогенным процессам. Сложные геокриологические процессы происходят при промерзании плотин, выполненных из крупнообломочного грунта – каменной наброски. Характерной особенностью формирования теплового режима в них является то, что он в основном происходит за счёт конвективного теплообмена с атмосферой. Так, на плотине Вилюйской ГЭС – 1,2 охлаждение низовой призмы плотины в первые годы эксплуатации было настолько интенсивным, что произошло промораживаниеподруслового талика р. Вилюй. Это позволило в тот период отказаться от цементации основания. В то же время в таких материалах в летний период за счёт конденсации влаги образуются лёдопородные массивы, которые практически останавливают конвективный теплообмен, и процесс формирования теплового режима сооружения меняет направление, то есть начинается растепление [4], [10], [12]. Охлаждающее влияние каменной наброски на температурный режим тела и основания плотины широко используется в северной гидротехнике и получило название «холодный штамп».

Опасным с точки зрения статической и особенно фильтрационной устойчивости плотин является резкий переход их из мёрзлого состояния в талое. В зависимости от инженерно-геокриологических условий оснований и грунтовых плотин интенсивность этого процесса может достигать очень больших скоростей. Непредсказуемо эти процессы протекают в коренных трещиноватых породах, трещины которых заполнены льдом, а также в льдонасыщенных породах в зонах тектонического дробления. Процесс вытаивания льда в трещинах происходит медленно, и фильтрация обнаруживается только тогда, когда образуются сквозные пути. В этом и состоит коварство этого процесса, так как возникшая струйная фильтрация приводит к интенсификации конвективного теплообмена водного потока с окружающими породами и стремительному увеличению зоны их оттаивания. Обнаруживается это, при отсутствии мониторинговой службы на гидроузле, уже на поздних стадиях развития процесса деградации мерзлоты. Результат – катастрофическое, практически мгновенное нарастание фильтрационных расходов, угроза аварии и потеря функционального назначения гидроузла.

В конце прошлого-начале текущего веков в связи с изменением климата на планете особенно активизировались уже упомянутые криогенные процессы. Изменение климата – свершившийся факт: потепление произошло и продолжается (Всемирная конференция [6]). Хотя есть работы, которые на основе частотно-амплитудного анализа изменения температуры воздуха и фактических наблюдений показывают, что темпы потепления в последнее время резко снизились на территории Европейского Севера России, северо-востоке Канады, в восточных районах Монголии, где даже наметилась тенденция к похолоданию [13]. По мнению член корреспондента РАНВ.Т.Балобаева, период потепления скоро закончится, и вновь наступит фаза похолодания [1]. Аналогичные процессы на Земле происходили не один раз. В основе изменения климата лежат так называемые климатические циклы, близкие к циклам солнечной активности, а также орбитальные и планетарные причины, обусловленные расположением Земли, других планет солнечной системы относительно Солнца при их вращении.

Это природное явление вызвало повышенный интерес человечества, так как процессы, происходящие на Земле, затрагивают все сферы деятельности людей. Особенно повышаются риски природопользования на обширнейшей территории криолитозоны, занимающей более 65% территории России, и куда, как известно, перемещается эпицентр развития производительных сил страны.

Потепление привело к изменению температурного режима в слое годовых теплооборотов, в котором находятся инженерные сооружения. Однако следует отметить, что от назначения сооружения температурные изменения в них по-разному сказываются на общем состоянии их устойчивости. Известно, что строительные свойства дисперсных мерзлых грунтов зависят от их температуры. Так, сопротивление сдвигу по поверхности смерзания мерзлых глинистых и песчаных грунтов при изменении температуры с – 4 °С до – 1 °С уменьшается в 2,5 раза [16], что очень опасно для устойчивости промышленных и гражданских объектов. Для гидротехнических сооружений, где используются мерзлые грунты в качестве противофильтрационных преград, требования к температуре не столь высокие (рекомендуемые температуры порядка минус 2 °С), так как фильтрационные свойства их при вышеуказанных температурных изменениях практически остаются неизменными. Массив будет водонепроницаемым до тех пор, пока существует лёд. Наличие льда в порах грунта, конечно же, обусловлено сложным термодинамическим состоянием системы,но с практической точки зрения противофильтрационная способность мёрзлых грунтов будет находиться в широком температурном диапазоне – от близких к нулю до низких температур.

Вместе с тем не следует связывать потерю устойчивости природно-технических комплексов, где имеют место ошибки проектно–строительных работ, а также недопустимо низкий эксплуатационный уровень, с потеплением климата.

Рассмотрим переход грунтовых плотин из мерзлого типа в талый на примере гидроузела Аркагалинской ГРЭС.

Гидроузел расположен на р. Мяунджа в пос. Мяунджа Сусуманского района Магаданской области (координаты 63 ^{0}02$^{/}$03$^{//}$ с.ш. 147^{0}10$^{/}$50$^{//}$ в.д.). Построен в 1952 – 1955 гг. для образования водохранилища–охладителя Аркагалинской ГРЭС (АрГРЭС). Это один из первых гидроузлов мёрзлого типа, построенных на северо–востоке России.

Река Мяунджа впадает в один из притоков р. Колымы в её верховьях. Питание реки осуществляется весной от таяния снега, осенью – от дождей. Зимой стока нет, река полностью промерзает. Среднегодовая сумма осадков не превышает 270 мм. – 75% осадков выпадает летом и осенью, высота снега достигает 350 мм. Среднегодовая температура воздуха составляет – 12,7 ^{0}С, максимальная температура приходится на июнь + 16,6 ^{0}С, минимальная в январе –44^{0}С, абсолютный минимум – 55 ^{0}С. Гидроузел возведён в районе сплошного распространения многолетнемерзлых пород мощностью 180 – 200 м. Глубина сезонного протаивания изменяется от 0,5 до 3,5 м. Подрусловой талик в створе плотины составлял 20 м.

В состав гидроузла входят: водохранилище, земляная плотина мерзлого типа, бетонный водослив, водосбросный канал с консольным водосбросом. Общий вид гидроузла приведен на рис. 1.

Водохранилище сезонного регулирования, полезный объём равен 4400 тыс. м^{3}.

Плотина земляная мёрзлого типа, высотой 12,0 м, длиной по гребню 870 м. и шириной 11,5 м, отсыпана из смеси гальки, гравия и песка. Коэффициент заложения откосов равен: верхового – 2, низового – 1,5. В качестве противофильтрационного устройства служит мерзлое ядро с зубом из щебнистого суглинка шириной по основанию 6 м, врезанного в аллювиальные отложения основания плотины. Для тепловой защиты мерзлого ядра по откосам и гребню был уложен слой

торфа, по которому выполнено каменное крепление.Упорные призмы плотины отсыпаны из гравийно–галечных грунтов, представленных грубо обкатанными обломками глинистых песчаников неоднородного гранулометрического состава: галечника – 20 – 60 %, гравия – 40 – 60 % и песка с примесью пылеватых частиц 10 – 20 %. Грунт ядра плотины в карьере имел следующий гранулометрический состав: щебень и дресва – 40 – 50 %, мелкозем с фракциями менее 0,25 мм – 15 – 20 %. Число пластичности – в пределах 8,5 – 9,3. Суглинок для ядра плотины заготовлялся в карьере бульдозерами послойно по мере естественного оттаивания и укладывался в талом состоянии при положительных температурах воздуха. В нижней части зуба грунт уплотнялся вручную, а в дальнейшем грунт уплотнялся бульдозерами или 10-тонными катками.

В основании плотины залегают коренные породы, представленные базальтами, андезитами и андезитобазальтами различной степени выветрелости. Разрушенные породы сильнотрещиноваты, трещины заполнены льдом и мелкоземом. Коренные породы перекрыты аллювиально-делювиальными отложениями, представленными на склонах щебенистыми супесями и суглинками, в русле гравием и галечниками мощностью до 4 – 5 м.

Рис. 1. Гидроузел на р. Мяунджа. Общий вид со стороны верхнего бьефа

На пойме аллювий прикрыт слоем торфяников и льдистых супесей мощностью до 1 м. Осадка аллювия при оттаивании составляет 10 – 15 %. В пределах основного русла и протоки р. Мяунджа были обнаружены два талика мощностью до 20 м. Правобережный пологий склон в месте примыкания плотины сложен мелкодисперсными илисто-торфянистыми грунтами делювиально-солифлюкционного типа с большим содержанием подземного повторно-жильного льда. В плане эти криогенные проявления образуют полигональную сетку со сторонами 15 – 20 м. Жилы льда прослеживаются до глубины 5 – 7 м.

Бетонный водослив практического профиля с шириной водосливного фронта 200 м расположен в скальных грунтах на левом берегу речной долины, рассчитан на пропуск 338 м^3/с. Противофильтрационные мероприятия в основании водосбросного тракта отсутствуют.

Эксплуатация

Следует отметить, что для образования мерзлого массива в теле и основании плотины в периоды строительства и эксплуатации использовались различные типы замораживающих систем. Первоначально для промораживания грунтов тела плотины и подруслового талика в зимний период была устроена воздушная замораживающая система вертикальных замораживающих колонок на участке длиной 330 м с шагом 1,5 м в русле и 2 м в остальной части. Система состояла из 494 вертикальных коаксиально расположенных труб диаметром 100 и 57 мм, длиной от 16 до 24 м, которые были заглублены в коренные породы основания на 6 – 10 м. Внутренние трубы подсоединялись к металлическому коробу, из которого воздух откачивался вентилятором производительностью 10000 м^3 /ч. Расход воздуха через одну колонку – 200 м^3/ч. Один вентилятор обслуживал 50 колонок.

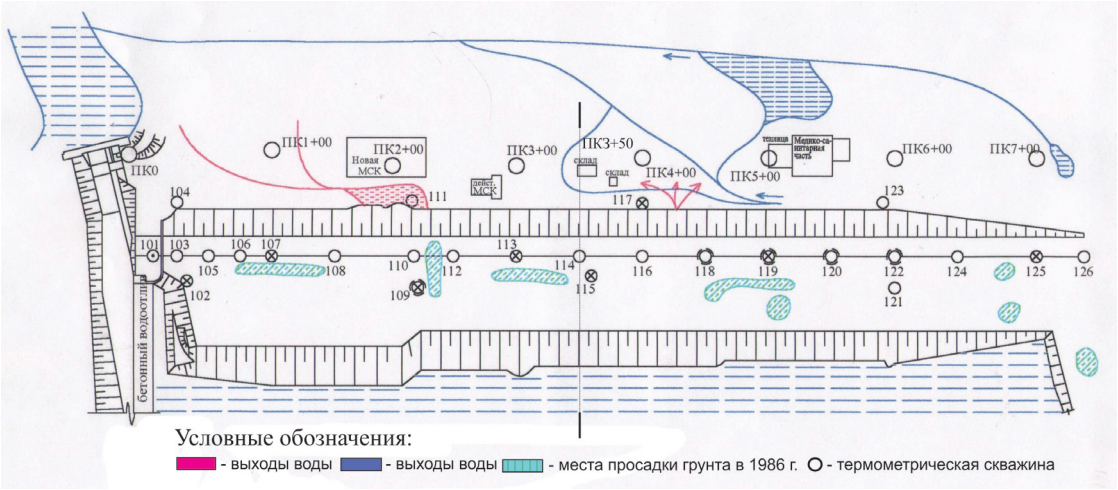

Рис. 2. Гидроузел на р. Мяунджа. Схема расположения скважин, места выхода фильтрации и просадки в теле плотины

Принятая схема откачки воздуха через внутреннюю трубу обеспечивала поступление холодного естественного воздуха во внешнюю, повышая эффективность теплообмена с талыми грунтами. В течение 1953 – 1954 гг. этой системой охлаждения удалось переморозить подрусловой талик.

К зиме 1955 г. плотину отсыпали на высоту 7,2 м, но вынуждены были приостановить её дальнейшую отсыпку, так как в августе этого же года при заполнении водохранилища на 3 м. под бетонным водосливом была обнаружена фильтрация, которая имела прогрессирующий характер. Произошло это по причине отсутствия под водосбросом каких-либо противофильтрационных мероприятий в виде цементационной или мерзлотной завесы. Эта часть гидроузла была запроектирована и построена по второму принципу, то есть по талому варианту.

С мая 1955 г. по май 1957 г. талик развился на глубину более чем 45 м и в сторону плотины на 90 – 95 м. Этот процесс сопровождался нарастанием фильтрационных расходов, что потребовало специальных мероприятий. Здесь налицо грубое нарушение СНиП – совмещение по водонапорной линии двух принципов строительства при возведения гидроузлов в условиях криолитозоны.

Для возврата воды в водохранилище были построены зумф и насосная станция. Объём перекачки доходил до 7 тыс.м^3/сутки. Процесс оттаивания стал приобретать угрожающий характер, поэтому произвели следующие работы: произвели цементацию протаявших участков основания, усилена замораживающая система, сделана отсыпка суглинистого понура толщиной 0,3 – 0,5 м перед водосбросом, пригрузили низовой откос плотины гравийно-галечным грунтом. В конце августа 1957 г. воздушная замораживающая система, работающая только зимой, была заменена на круглогодично действующую рассольную систему. Жидкостная замораживающая система была установлена на расстоянии 2 м от воздушных колонок, с шагом 1,5 м.

На рис. 3. показаны типичное поперечное сечение плотины и температурное поле, отражающее работу замораживающих колонок [18].

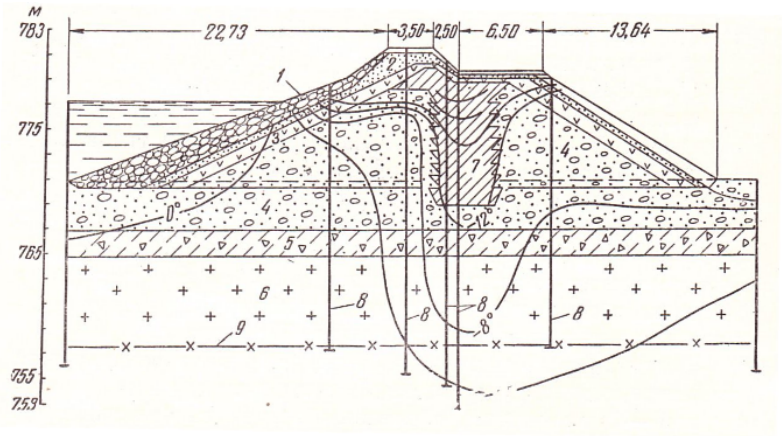

Рис. 3. Гидроузел на р. Мяунджа. Температурное поле в поперечном разрезе на 30.01.1957 г. [18]: 1 – каменная отмостка; 2 – песок; 3 – торф; 4 – песчано-гравийный грунт; 5 – суглинок щебенистый; 6 – андезитобазальты выветрелые, трещиноватые; 7 – суглинок щебенистый; 8 – скважина термометрическая; 9 – граница многолетнемёрзлых пород (положение на момент окончания строительства)

К концу 1959 г. отмечена наибольшая угроза разрушения плотины из-за утечки рассола из замораживающей системы и суффозии засоленного грунта ядра – в теле плотины образовались пустоты и провальные воронки. Аварийную ситуацию удалось ликвидировать только в 1960 – 1962 гг. в результате проведения цементации трещиноватых скальных пород в основании водосброса и плотины на глубину 40 м от гребня [5]. Это сократило фильтрационный поток более чем в 10 раз и позволило в 1962 г. вновь создать мерзлотную завесу в ядре плотины и основании до 20 м, но на участках, где не наблюдалась фильтрация. Так выглядела ситуация на Мяундженском гидроузле Аркагалинской ГРЭС на период с конца 60-х начала 70-х годов прошлого столетия. На тот момент были сделаны следующие выводы. Основной принципиальной ошибкой проектировщиков и строителей, реализовавших это проектное решение, было совмещение двух принципов использования грунтов тела и основания плотины по напорному фронту. Бетонный водослив был построен без каких-либо противофильтрационных устройств, а также без сохранения вечной мерзлоты в основании как надежного водоупора, а земляная плотина – с её сохранением. В результате интенсивное оттаивание скальных трещиноватых грунтов в основании водослива начало оказывать отепляющее воздействие на состояние льдогрунтовой стенки в земляной плотине. Устранение этого влияния потребовало больших ремонтных работ и значительных материальных затрат. Даже после 20-ти лет эксплуатации не представлялось возможным говорить об установлении температурного режима сооружения. Недостатком конструкции водосбросного сооружения является недостаточное заглубления зуба ядра плотины в основание – зуб не прорезал слабые аллювиальные отложения и не был врезан в коренные породы.

Данные последующих лет по состоянию гидроузла свидетельствуют о том, что мероприятия по обеспечению устойчивости гидроузла продолжались. Так, в 1974 – 1977 гг. с целью сокращения фильтрационных потерь и улучшения термического режима сооружения было выполнено расширение верховой призмы плотины на 15 – 34 м. в сторону водохранилища с одновременным повышением отметки гребня на 1 – 2 м. В результате эксплуатции было установлено, что надежная работа мерзлого противофильтрационного ядра плотины обеспечивается при его толщине в 3 м. Однако оказалось, что многолетние работы по восстановлению нормальной работы мерзлотной завесы не увенчались успехом. С 1998 г. морозильная система была отключена. В настоящее время плотина работает по II (талому) принципу.

По данным обследования и исследований гидроузла Северо-Восточной научно-исследовательской станции Института мерзлотоведения СО РАН (СВНИМС ИМЗ СО РАН), проведённых в конце прошлого-начале настоящего века,следует, что оно находится в удовлетворительном состоянии и выполняет возложенные на него функции обеспечения водой ГРЭС [11]. Однако с точки зрения теплового режима гидроузел претерпел большие изменения. В результате длительной эксплуатации сооружение перешло ***из мерзлого в талое*** состо-

яние [7]. В настоящее время стоит вопрос об официальном переводе его в работу по талому варианту. На рис. 4 изображено тепловое состояние тела и основания плотины в продольном разрезе в 2002 г. На рис. 5 показано тепловое состояние гидроузла по продольной оси сооружения за период 1999 – 2010 гг.

Материалы натурных исследований, приведенные на рисунках 3 – 5, наглядно иллюстрируют переход сооружений гидроузла на р. Мяунджа из мёрзлого в талое состояние.

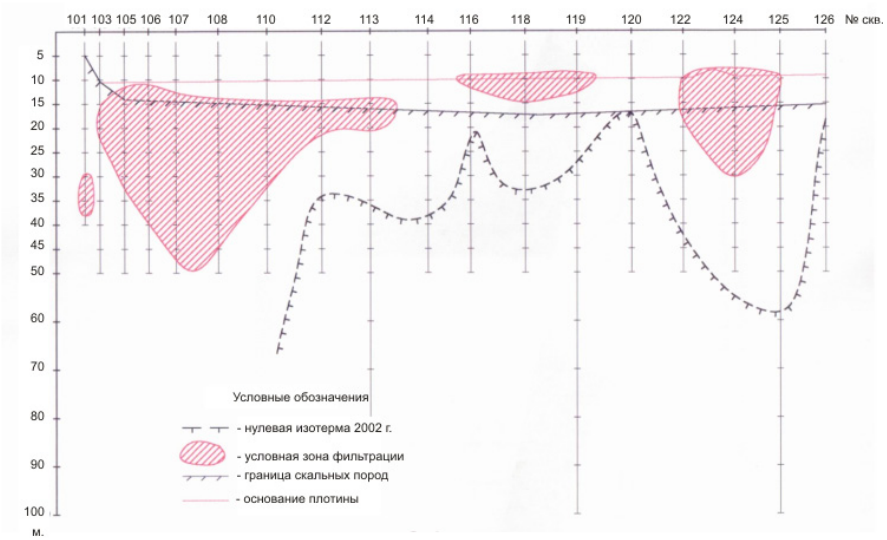

Рис. 4. Гидроузел на р. Мяунджа. Тепловое состояние тела и основания плотины в продольном разрезе в 2002 г.[11]

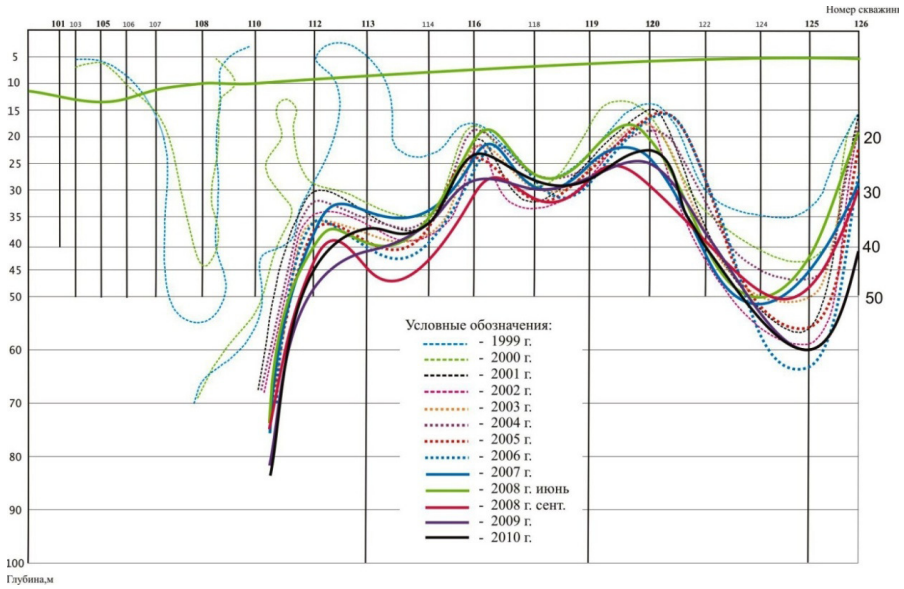

Рис. 5. Гидроузел на р. Мяунджа. Динамика нулевой изотермы в продольном сечении плотины за период с 1999 по 2010 гг.[8]

Выводы

Таким образом, на примере Мяунджеского гидроузла получен ценный научный и практический результат: в суровых климатических и сложных геокриологических условиях криолитозоны Восточной Сибири возможен переход гидротехнического сооружения ***из мёрзлого в талое***. При этом сооружение обладает статической и противофильтрационной устойчивостью. В дальнейшем возникает принципиальный вопрос о формировании принципов строительства гидротехнических сооружений в условиях криолитозоны, который должен быть четко прописан в СНиП.

Список литературы

1. Балобаев В.Т., Скачков Ю.Б., Шендер Н.И. Прогноз изменения климата и мощности мерзлых пород центральной Якутии до 2200 года // География и природные ресурсы. – Новосибирск: Наука, 2009. – № 2. – С. 50-56.

2. Биянов Г.Ф. Плотины на вечной мерзлоте. – М.: «Энергия», 1975. – 184 с.

3. Биянов Г.Ф., КогодовскийО.А., Макаров В.И. Грунтовые плотины на вечной мерзлоте. – Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1989. – 152 с.

4. Буряков О.А. Температурный режим низовых упорных призм плотин из каменной наброски в условиях Севера: Автореф.дис.канд.техн. – С.-Петербург, 2014. – 16 с.

5. Ведерников Л.Е. Мерзлотные процессы в теле и основании плотины на р. Мяундже//Труды ВНИИ-1. – Магадан, 1963. – Т.XXII. – С. 179–239.

6. Всероссийская конференция « Изменение климата в XXI веке: современные тенденции, прогностические сценарии и оценка последствий». – СПб.: ИНЕНКО, 2005. – 47 с.

7. Гулый С.А. Исследование причин изменения физико-механических свойств грунтов в теле плотины Аркагалинской-ГРЭС // Гидротехническое строительство. – 2007. – №12. – С. 2-7.

8. Гулый С.А. Анализ работы плотины, перешедшей с мерзлого на талый тип эксплуатации (на примере плотины АрГРЭС) на р. Мяундже // Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы IX Международного симпозиума (г. Мирный, Россия, 3-7 сентября 2011г.). – Якутск: Изд-во УРАН ИМЗ СО РАН, 2011. – С. 238 – 242.

9. Инструкция по проектированию гидротехнических сооружений в районах распространения вечномёрзлых грунтов. ВСН 30 – 83. – Л., 1983. – 100 с.

10. Каменский Р.М. Термический режим плотины и водохранилища Вилюйской ГЭС / Институт мерзлотоведения СО АН СССР. - Якутск, 1977. – 91 с.

12. НТО СВНИМС СО РАН. Геокриологический контроль грунтовой плотины АрГРЭС. Договор № 27-2001. Магадан, 2002. – 24 с.

13. Оловин Б.А. Медведев Б.А. Динамика температурного поля плотины Вилюйской ГЭС. – Новосибирск: Наука, 1980. – 48 с.

14. Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России. – Новосибирск: Изд- во «Гео», 2005. – 55 с.

15. Рекомендации по проектированию и строительству плотин из грунтовых материалов для производственного и питьевого водоснабжения в условиях крайнего севера и вечной мерзлоты. – М.: НИИ ВОДГЕО, Стройиздат, 1976. – 112 с.

16. Рекомендации по проектированию и строительству. Низконапорные гидроузлы криолитозоныЯкутии. – Якутск: Изд-во ФГБУН ИМЗ СО РАН, 2012. – 121с.

17. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. – М.,1990. – 71 с.

18. СНиП 2.06.05-84*. Плотины из грунтовых материалов. – М., 1991. – 49 с.

19. Цветкова С.Г. Опыт строительства плотин в районах распространения многолетнемёрзлых грунтов. Материалы к основам учения мерзлой коры. Вып. VI / АНСССР, 1960. – С. 87 – 110.

20. Чжан Р.В. Прогноз температурного режима низко- и средненапорных грунтовых плотин в Якутии. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 1983. – 43 с.

21. Чжан Р.В. Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений низкого напора в криолитозоне(на примере Якутии). – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2000. – 158 с.

22. Чжан Р.В. Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2002. – 207 с.

References

1. BalobaevV.T., SkachkovJu.B., ShenderN.I. Prognozizmenenijaklimataimoshhnostimierzlyhporodcentral'nojJakutiido 2200 goda.Geografijaiprirodnyeresursy. – Novosibirsk: Nauka, 2009, no. 2. – p. 50-56.

2. Bijanov G.F. Plotinynavechnojmerzlote. – M., «Jenergija», 1975. – 184 p.

3. Bijanov G.F., Kogodovskij O.A., Makarov V.I. Gruntovyeplotinynavechnojmerzlote. – Jakutsk: IMZ SO AN SSSR, 1989. – 152 p.

4. Burjakov O.A. Temperaturnyjrezhimnizovyhupornyhprizmplotinizeamennojnabroski v uslovijahSevera.Avtoref.dis.kand.tehn. - S-Peterburg, 2014. – 16 p.

5. Vedernikov L.E.. Merzlotnye processy v tele i osnovanii plotiny na r. Mjaundzh.e//Trudy VNII-1. – Magadan, 1963. T.XXII. – pp. 179 – 239.

6. Vserossijskajakonferencija «Izmenenieklimata v XXI veke: sovremennyetendencii, prognosticheskiescenariiiocenkaposledstvij». - SPb.: INENKO, 2005. – 47 p.

7. Gulyj S.A. Issledovanieprichinizmenenijafiziko-mehanicheskihsvojstvgruntov v teleplotinyArkagalinskojGRJeS. Gidrotehnicheskoestroitel'stvo, no. 12, 2007, pp. 2-7.

8. Gulyj S.A. Analizrabotyplotiny, pereshedshej s merzlogonatalyj tip jekspluatacii (naprimereplotinyArGRJeS) na r. Mjaundzhe.Problemyinzhenernogomerzlotovedenija: Materialy IX Mezhdunarodnogosimpoziuma (g. Mirnyj, Rossija, 3-7 sentjabrja 2011g.). - Jakutsk, Izd-vo URAN IMZ SO RAN, 2011. – pp. 238 – 242.

9. Instrukcija po proektirovaniju gidrotehnicheskih sooruzhenij v rajonah rasprostranenija vechnomjorzlyh gruntov. VSN 30 – 83. – L., 1983. – 100 p.

10. Kamenskij R.M. Termicheskijrezhimplotinyivodohranilishha ViljujskojGJeS.Institutmerzlotovedenija SO AN SSSR. – Jakutsk, 1977. – 91 p.

12. NTO SVNIMS SO RAN «Geokriologicheskijkontrol' gruntovojplotinyArGRJeS».Dogovor no. 27-2001. Magadan, 2002. - 24 p.

13. Olovin B.A. Medvedev B.A. Dinamikatemperaturnogo poljaplotinyViljujskojGJeS. – Novosibirsk: Nauka, 1980. – 48 p.

14. Pavlov A.V., Malkova G.V. Sovremennye izmenenija klimatana severe Rossii. - Novosibirsk, Izd- vo «Geo», 2005. – 55 p.

15. Rekomendaciipoproektirovanijuistroitel'stvuplotinizgruntovyhmaterialovdljaproizvodstvennogoipit'evogovodosnabzhenija v uslovijahkrajnegoseveraivechnojmerzloty. – M.: NII VODGEO, Strojizdat, 1976. – 112 p.

16. Rekomendaciipoproektirovanijuistroitel'stvu. NizkonapornyegidrouzlykriolitozonyJakutii.– Jakutsk, Izd-vo FGBUN IMZ SO RAN, 2012, – 121np.

17. SNiP 2.02.04-88. Osnovanijaifundamentynavechnomjorzlyhgruntah. – M.,1990. – 71 p.

18. SNiP 2.06.05-84*. Plotinyizgruntovyhmaterialov. – M., 1991. – 49p.

19. Cvetkova S.G. Opytstroitel'stvaplotin v rajonah rasprostranenijamnogoletnemjorzlyhgruntov. Materialy k osnovamuchenijamerzlojkory, vyp. VI. Izd-vo AN CCCR 1960. – pp. 87 – 110.

20. Chzhan R.V.Prognoztemperaturnogorezhimanizko-isrednenapornyhgruntovyhplotin v Jakutii. –Jakutsk, izd-vo IMZ SO RAN, 1983. – 43 p.

21. Chzhan R.V. Proektirovanie, stroitel'stvoijekspluatacijagidrotehnicheskihsooruzhenijnizkogonapora v kriolitozone (naprimereJakutii). – Jakutsk, Izd-vo IMZ SO RAN, 2000. – 158 p.

22. Chzhan R.V.Temperaturnyjrezhimiustojchivost' nizkonapornyhgidrouzlovigruntovyhkanalov v kriolitozone.Jakutsk, Izd – vo IMZ SO RAN, 2002. – 207 p.

Рецензенты:

Шестернёв Д.М., д.т.н., с.н.с., профессор, заведующий лабораторией инженерной геокриологии, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск;

Кузьмин Г.П., д.т.н., с.н.с., г.н.с. лаборатории инженерной геокриологии, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск.

Работа поступила в редакцию 10.06.2014.