

*На правах рукописи*

**ШЕРМАН**

Михаил Макарович

**ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА ПЛОТИН,  
ВОЗВОДИМЫХ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ  
ПОЛУСКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ  
(НА ПРИМЕРЕ ВИЛЮЙСКОЙ ГЭС-III)**

Специальность 05.23.07 – Гидротехническое строительство

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

г. Санкт-Петербург

2003 г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Экономическое и социальное развитие России связано с освоением сырьевых и энергетических ресурсов районов Сибири, Дальнего Востока и Северо-востока страны. На большей части территории России распространены многолетнемерзлые грунты, которые занимают значительную площадь – 11 млн. км<sup>2</sup>, что составляет 47 % всей территории страны.

Многолетнемерзлые грунты занимают большую часть Сибири и Арктики. Любой вид хозяйственной деятельности неизбежно вызывает необходимость строительства гидротехнических сооружений для создания водохранилищ водохозяйственного и энергетического назначения. Возведение и эксплуатация гидротехнических объектов на многолетнемерзлых основаниях имеет ряд особенностей, связанных с инженерно-геологическими и геокриологическими условиями.

Родоначальницей крупного плотиностроения на многолетней мерзлоте является плотина Вилюйской ГЭС - I-II высотой 75 м, при проектировании и строительстве которой были решены многие инженерные проблемы гидротехнического строительства в суровых природных условиях Крайнего Севера.

Научно-технические разработки, опыт проектирования и строительства Вилюйской ГЭС - I-II широко использовались на других гидротехнических объектах: Усть-Хантайской ГЭС, Колымской ГЭС, Курейской ГЭС, Вилюйской ГЭС-III, Усть-Среднеканской ГЭС.

Отечественный опыт строительства и эксплуатации крупных плотин в северных условиях имеет сравнительно короткий срок – около четырех десятилетий. За это время была создана нормативная база для проектирования и строительства гидротехнических сооружений. Возникла новая отрасль науки – Северная гидротехника. Ее выделение из общей науки о гидротехнике объясняется природными условиями строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в Северной строительной-климатической зоне, которые настолько разнообразны и индивидуальны, что на каждом крупном объекте возникали новые проблемы, которые приходилось решать в процессе возведения и эксплуатации сооружений.

Научный анализ и обобщение опыта строительства и эксплуатации сооружений позволяют сокращать «белые пятна» в Северной гидротехнике и не повторять ошибочных решений.

Строительство Вилюйской ГЭС-III осуществлялось в весьма сложных инженерно-геологических и геокриологических условиях, примеров которым в мировой и отечественной практике гидротехнического строительства не имеется. По их совокупности Вилюйская ГЭС-III занимает особое положение, а условия создания противофильтрационных устройств каменно-земляных плотин оцениваются, как уникальные, не имеющие аналогов.

Из многочисленных проблем строительства плотин типа Вилюйской ГЭС- III выбрано совершенно не исследованное направление – разработка технологии возведения противофильтрационной завесы в послепостроечный период плотины, расположенной на «вечномерзлом» основании.

Работы выполнялись в соответствии с Государственной программой по теме 04.02.M2, проблема 0.55.08 "Разработать и внедрить новые технологические решения и технологию строительства гидроэлектростанций в сложных природно-климатических условиях".

Целью работы являлась разработка и обоснование технологий и способов строительства противофильтрационных устройств напорных гидротехнических сооружений, применительно к каменно-земляным плотинам, находящимся в сложных геологических и геокриологических условиях многолетней мерзлоты на основании обобщения опыта

изыскательских, проектных, научно-исследовательских и опытно-экспериментальных работ.

Методической основой выполнения работы являлись:

- опытно-производственные исследования, проводимые в процессе технологической последовательности создания противофильтрационных элементов плотины;
- контроль качества восстановления области сопряжения ядра с основанием с применением разведочного бурения и средств КИА.

Научная новизна диссертации заключается в том, что в ней впервые в практике строительства гидротехнических сооружений на многолетнемерзлых грунтах оснований, в весьма сложных геологических условиях, не имеющих аналогов в мировой и отечественной практике, предложены обоснованные технологии возведения элементов плотин: ядра и противофильтрационной завесы.

В отличие от известного способа предпостроечного оттаивания многолетнемерзлых грунтов основания разработан новый способ - искусственное оттаивание грунтов под ядром плотины и устройство противофильтрационной завесы в период после этапа или полного возведения ядра плотины.

Личный вклад автора заключается:

- в разработке новой технологии возведения противофильтрационных элементов плотин.
- в проведении опытно-производственных исследований непосредственно на строительстве каменно-земляной плотины;
- в анализе и оценке результатов проектных и опытно-производственных работ, в разработке вопросов новой технологии возведения противофильтрационных элементов плотины.

Практическая ценность изложенных в диссертации результатов работы состоит:

- в разработке и проверке на практике методов и технологии строительства напорных гидротехнических сооружений в весьма сложных природных условиях;
- в разработке рекомендаций по организации и проведению работ при возведении противофильтрационных устройств с применением электрооттайки в условиях обводнения основания плотины высокоминерализованными водами-криопэгами;
- в разработке рекомендаций по контролю качества выполнения противофильтрационной завесы;
- в разработке рекомендаций по применению электронагревателей для оттаивания грунтов основания.

На защиту выносятся:

- метод создания цементационной завесы в послепостроечный период плотины с грунтовыми противофильтрационными элементами, расположенными на многолетнемерзлых основаниях, обводненных водами-криопэгами с отрицательными температурами.
- результаты опытно-производственных работ по созданию цементационной завесы в основании ядра плотины; обеспечивающих фильтрационную прочность контакта ядро-цемзавеса.
- технология оттайки вечномерзлых полускальных и рыхлых горных пород в условиях фильтрующих минерализованных подземных вод и результаты опытно-производственных работ.

Апробация работы.

Основные результаты, полученные в процессе выполнения диссертационной работы, обсуждались на технических совещаниях, технических Советах ОАО Ленгидропроекта, Гидроспецпроекте, Виллюйгэсстроля, ВНИИГ им. Б.Е.Веденева, на научных

семинарах СПбГПУ, МЭИ. Главной апробацией является создание противотриационной завесы в основании плотины Вилюйской ГЭС-III.

#### Публикации.

Основные положения диссертации опубликованы в 4 печатных работах.

#### Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы из 58 наименований.

Работа содержит 118 страниц машинописного текста, 32 рисунков и 10 таблиц.

### **Основное содержание работы.**

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы ее цель, научная новизна, практическое значение, область реализации вопросов темы диссертации при строительстве каменно-земляной плотины. Отмечается, что для условий Крайнего Севера в отечественном гидростроительстве осуществляется преимущественное возведение плотин из местных материалов по «талому» способу. Приводятся краткие справки об осуществленном гидроэнергетическом строительстве на Крайнем Севере, об организациях, участвующих в осуществлении северного плотиностроения. Подчеркивается большой вклад в создание науки «Гидротехника Севера» отечественных инженеров и ученых разных поколений, таких как Г.Ф.Биянов, А.К.Бугров, И.М.Васильев, Ю.С.Васильев, В.И.Вуцель, С.С.Вялов, А.Я.Гольдин, Б.Н.Далманов, А.Н.Демидов, В.Н.Жиленков, Ю.К.Зарецкий, П.Л.Иванов, А.А.Каган, О.А.Когодовский, В.В.Колеганов, Н.Ф.Кривоногова, Я.А.Кроник, Л.И.Кудояров, С.А.Кузьмин, В.С.Кузнецов, В.Л.Куперман, Е.Д.Лосев, Т.В.Матрошилина, В.Д.Макаров, И.А.Максимов, В.Г.Мельник, В.А.Мельников, И.С.Моисеев, Н.А.Мухетдинов, Ю.Н.Мызников, Р.М.Нарбут, М.П.Павлич, В.А.Пехтин, Ю.П.Правдивец, В.Н.Придорогин, В.Г.Радченко, Л.А.Розин, Л.Н.Расказов, Д.Д.Сапегин, А.А.Серов, В.И.Телешев, В.В.Тетельмин, Л.А.Торопов, Г.Т.Трунков, В.А.Турчина, С.Б.Ухов, В.И.Федосеев, М.П.Федоров, В.Н.Фрумкин, Ю.И.Фриштер, А.М.Цвик, А.В.Чернобаева, Ю.Д.Чертыков, И.Н.Шишов, В.П.Ягин и других специалистов.

Приводится материал, который выносится на защиту диссертационной работы.

В первой главе рассматриваются и анализируются вопросы, связанные с особенностями строительства грунтовых плотин в северной строительной-климатической зоне страны. Показаны отличительные природные особенности условий строительства на Крайнем Севере: климатические, гидрологические режимы рек, инженерно-геологические.

Основная часть главы посвящена вопросу и оценке естественных грунтовых массивов, служащих как основание водоподпорных грунтовых гидротехнических сооружений. На конкретных примерах обсуждаются особенности свойств сезонномерзлых и многолетнемерзлых грунтовых массивов островного и сплошного распространения: прерывистость «таликами», температуры, мощности толщ, изменчивость последних; льдистость в различных породах, состояние пород по твердости – пластичности, фильтрационным свойствам, просадочности.

Общая характеристика свойств грунтовых массивов, находящихся в «вечномерзлом» состоянии, дополнена их поведением в условиях оснований водоподпорных гидротехнических сооружений. Здесь главное внимание уделено фильтрационным процессам. На конкретных примерах строительства и эксплуатации плотин Вилюйской, Хантайской, Курейской и Колымской ГЭС дан краткий анализ поведения горных пород оснований с пояснением механизма изменения свойств в процессе оттаивания. Указывается на характерные ошибки, которые могут быть допущены на стадии изысканий при определении водопроницаемости коренных пород.

В заключительной части главы приводится описание и дан анализ состояния построенных отечественных и зарубежных плотин мерзлого типа и их оснований с мерами мероприятий по обеспечению нормальной эксплуатации, с характерными повреждениями и аварийными ситуациями; со справочным материалом об отказах, подтверждающим более высокую надежность плотин «талого» типа.

В выводах первой главы подводится общий итог обсуждения и анализа рассмотренных и изученных материалов.

Глава вторая посвящена вопросам подготовки основания для строительства плотины. Оценка состояния основания и комплекс специальных исследований оказались определяющими при выборе для плотины Вилуйской ГЭС-III способа строительства по «талому» принципу, в разработке метода создания противofильтрационных элементов плотины в послепостроечный период, который и вынесен в представленной работе на защиту.

Известно, что для плотин мерзлого типа, как показывает опыт строительства и эксплуатации, критерием надежности является сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии и недопущение возникновения фильтрации воды через тело и основание плотины. При этом свойства грунтов оснований, находящихся в мерзлом состоянии вне зависимости от их природного различия по деформационным, прочностным и фильтрационным свойствам, выравниваются. Однако, влияние теплового режима водохранилища, обводнение верховой призмы приводят к необходимости разработки и осуществления мероприятий для исключения термопросадок верхового клина плотины и созданию мерзлотной завесы в теле и в основании, необходимости предусматривать в зонах сопряжения плотины с основанием специальные устройства (зубья, шпоры), иногда удаление слабых грунтов основания.

Для плотин талого типа мероприятия и способы подготовки оснований определяются в зависимости от деформативных характеристик грунтов, находящихся в условиях положительных температур. Для скальных пород оснований, при переходе их в талое состояние, наиболее важным показателем является водопроницаемость пород, которая и определяет необходимые меры по ее снижению. Чаще всего эта проблема решается устройством цементационной завесы. Примером может служить разработанная на строительстве Колымской ГЭС технология ее создания в условиях высоких скоростей фильтрации, с искусственным и естественным оттаиванием мерзлых гранитных пород.

Подготовка оснований, сложенных рыхлыми горными породами, определяется в зависимости от характеристик грунтов в оттаявшем состоянии. Решающими факторами здесь являются свойства грунтов в талом состоянии – скорости консолидации, фильтрационные, прочностные и деформационные свойства. Одним из способов подготовки оснований является удаление грунтов, обладающих неудовлетворительными характеристиками.

Подготовка оснований плотин, сложенных полускальными породами, имеет свои отличительные особенности, причем в некоторых случаях исключительные, как это имело место при строительстве плотины Вилуйской ГЭС-III.

Инженерно-геологические, мерзлотные и гидрогеологические характеристики основания в створе сооружений Вилуйской ГЭС-III заслуживают осветить их с некоторой подробностью.

Основание представлено глинисто-карбонатными породами в виде переслаивающихся мергелей, известняков, доломитов и реже песчаников; берега - оползневые образования с перемятой и раздавленной породой до щебня с наличием отдельных сохранных блоков, расчлененных трещинами разрыва и плоскостями скольжения. Льдистость в пределах 5–10 %, на отдельных участках – 15–30 % и даже до 50 %. Породы засолены (0,5–7 %), загипсованы (1–2 %), обводнены высокоминерализованными подземными водами – криопэгами с отрицательными температурами. Коэффициенты

фильтрации отдельных слоев пород составляют 20–35 м/сутки, 3–6 м/сутки, в сильно трещиноватых прослоях доломитов и известняках - до 50 м/сутки. Левобережным береговой склон имеет крупные субвертикальные трещины отрыва с шириной раскрытия от 1,0 до 70,0 см, чаще 10,0 см и менее крупные трещины скольжения от 0,1 до 2,0 см. Трещины имеют протяженность в сотни метров вдоль берега, заполнены льдом или обломочным материалом, а также пустотелые. В целом указанная система трещин образует сообщающуюся водопроводящую систему, способную служить обходными путями фильтрации, и, как следствие, вызывать деградацию мерзлоты, снизить устойчивость склона.

Свободная связь между трещинами была обнаружена специальными испытаниями - нагнетанием в одну из штолен воздуха с дымом с наблюдением выходов через другие штольни и скважины, которые распространялись на расстоянии от начального источника до 90-160 м. Коэффициенты фильтрации по пустотелым трещинам левого берега были оценены в тысячи и десятки тысяч м/сутки, по трещинам скольжения и в породах зоны разуплотнения правого берега – 80 – 120 м/сутки.

Мерзлотные условия основания отличаются наличием криогенной толщи двухъярусного строения с мощностью верхнего яруса на пойме от 20 до 80 м, по склонам – до 80 – 100 м. Поры и трещины пород нижнего яруса заполнены солеными водами-криопэгами с температурой до  $-3,2^{\circ}\text{C}$ . Температура пород на подошве слоя годовых колебаний на склонах и пойменных участках изменяется в широких пределах: от  $-2,0^{\circ}\text{C}$  до  $-6,3^{\circ}\text{C}$ , в русле реки: от  $0,8^{\circ}\text{C}$  до  $1,8^{\circ}\text{C}$ . Мощность жил льда по трещинам от 0,1 до 20,0 см, высота – 600–800 см.

Для общей оценки состояния основания в створе плотины следует отметить существенное влияние подземных вод таликовой зоны с глубиной в 84 м, которые в взаимной связи с поверхностными, надмерзлотными и подмерзлотными водами питают и разгружают подземные воды. Водопроницаемость пород таликовой зоны на глубинах до 60 м опробованы значительным количеством фильтрационных нагнетаний и откачек.

Результаты изучения состояния основания, исключительность этого состояния и определили решение по выбору способа строительства: плотину Вилюйской ГЭС-III возводить по «талому» принципу. Подтверждением такого решения служило следующее.

Для строительства с сохранением мерзлого состояния требовалось:

- сравнительно с «талым» вариантом увеличить расходы на 20-30 %;
- впервые в практике гидростроительства при напорах 30 м создать мерзлотную завесу глубиной до 70 м, в условиях обводнения основания засоленными водами-криопэгами с температурой  $-2,2 - 3,2^{\circ}\text{C}$  и при наличии прослоек пород с высокими коэффициентами фильтрации и широких пустотелых трещин большой протяженности.

Кроме того, учитывались:

- расчетно-теоретические разработки Нижегородского инженерно-строительного института;
- результаты опытно-полевых исследований по устройству глубокой мерзлотной завесы (100 м) для защиты левобережного примыкания грунтовой плотины Вилюйской ГЭС-III, выполненные для варианта строительства по «мерзлотному» типу (рис. 1).

Исходя из полученных натуральных результатов работы замораживающих установок, было бы недопустимым полагать, что можно создать глубокую надежную мерзлотную завесу в основании гидротехнических сооружений Вилюйской ГЭС-III и заморозить русловой талик с фоновой температурой пород  $+1,8^{\circ}\text{C}$  и наличием подземных вод-криопэгов с температурой от  $-2,2^{\circ}\text{C}$  до  $-3,2^{\circ}\text{C}$ .







Последний фактор, по нашему мнению, являлся одним из решающих в отказе от возведения плотины по «мерзлому» принципу.

Опытно-исследовательские работы показали, что за три года эксплуатации замораживающих установок радиус грунтового цилиндра с температурой – 3,2 °С на глубине до 60 м достиг лишь 2,8 м, а в интервале глубин 60–100 м всего лишь 1,6 м (рис. 2).

Главная задача перед проектировщиками и строителями состояла в необходимости разработки метода создания противofильтрационных устройств, в решении технологических задач метода. Для этой цели потребовались изыскательские, проектные и производственные работы перевести в плоскость опытно-исследовательских и опытно-производственных, что и было выполнено с участием Ленгидропроекта, Гидроспецпроекта,

СибНИИГа, Виллойгэстроя, Виллойского управления Гидроспецстроя и др. организаций.

В третьей главе рассматривается технология искусственного оттаивания многолетнемерзлых грунтов основания с применением новых разработок для цели создания противofильтрационной завесы под водоподпорными сооружениями на примере строительства Виллойской ГЭС-III. Исключительность обстановки поставила перед исследователями, проектировщиками и строителями сложную задачу - найти решение для создания противofильтрационной завесы в условиях высокого уровня нарушенной сплошности в породах основания и наличия минерализованных вод с динамикой их движения в сторону талика.

Для решения проблемы предварительно были рассмотрены все известные способы искусственного оттаивания: гидравлические холодной и нагретой водой, паром, электрическим током с технологическими отличиями и особенностями каждого.

Анализ условий строительства Виллойской ГЭС- III и учет опыта строительства Нерюнгринской ГРЭС и Колымской ГЭС показал, что выбор метода следует сделать в основном с позиций обеспечения надежности работы сооружения, а не с позиций весьма условной оценочной стоимости.

Электрический способ оттаивания, по сравнению с гидравлическими способами, в условиях строительства Виллойской ГЭС- III имеет следующие преимущества: исключалось сезонное ограничение работ; снимались проблемы обеспечения устойчивости откосов котлованов, устраиваемых под основные и временные сооружения; возведение основных сооружений не зависело от хода работ по оттаиванию основания; решались проблемы устойчивости обводненных откосов выемок в слабых породах и заиливания котлованов сооружениями мелкодисперсными грунтами - продуктами гидрооттайки. В результате, все научные, проектные и производственные работы были направлены на разработку метода, позволяющего надежно обеспечивать и контролировать качество строительных работ, что и достигалось применением электрического способа, позволяющего управлять процессами оттаивания.

Для устройства противofильтрационной завесы требовалось оттаять многолетнемерзлые грунты на ширину 13–18 м и глубину до 65 м, с расчетом, что до постановки сооружений под напор породы под ядром и фильтрами должны оттаять, частично консолидироваться и укреплены инъекцией до требуемых свойств. Отметим, что устройство потерны по ряду причин исключалось, в том числе и из-за невозможности сохранить ее целостность вследствие ожидаемых деформаций основания.

В результате изучения и анализа проблемы впервые были предложены, разработаны и осуществлены методы устройства противofильтрационных элементов плотин (ядра и цемзавесы), после возведения сооружений на определенную высоту с оттаиванием пород основания под ядром в послепостроечный период (рис. 3, 4).





Работы по оттаиванию пород основания производились с поверхности возведенных плотин путем бурения скважин через ядро с шагом 4–6 м. В скважинах размещались электронагреватели омического типа.

Отработка технологии и параметров электрооттаивания пород, обводненных подземными водами-криопэгами с отрицательными температурами, выполнялась путем проведения опытно-производственных работ из двух штолен длиной 65 м с железобетонной облицовкой, устроенных в левобережном примыкании плотины. В течение первых двух месяцев с начала электрооттаивания параметры нагревателей практически не отличались от расчетных.

По мере расширения зоны оттаивания возникало неравномерное распределение токов, наблюдалась концентрация токов в нагревателях, в местах близких к точкам подключения фаз; имел место последовательный выход нагревателей из строя из-за разрыва стальных электродов у устья скважины.

Опытно-производственными исследованиями было установлено: причина токов утечки - наличие в скважине участков, незаполненных цементным раствором и отсутствием электроизоляции электродов; разрыв электродов - следствие действия растягивающих усилий от зависания оттаявшего грунта и сильного разогрева стальных электродов в устьевой части.

Температурный режим в грунтовом массиве был неравномерным. Имелись зоны с температурой до +20 °С и зоны замороженного грунта, как следствие влияния токов утечки и выноса тепла водами - криопэгами.

Неустойчивые процессы электрооттаивания и несовершенство конструкции электронагревателей вызвали необходимость корректировки технологии электрооттайки, чтобы обеспечить необходимый уровень управляемости процессом оттаивания.

Проблема токов утечки была решена двумя путями: разработкой новой конструкции электронагревателя и снижением их мощности в 2–3 раза.

Новый электронагреватель изготавливался в заводских условиях из двух элементов путем обетонирования стальных электродов. При монтаже обетонированные элементы соединялись электросваркой, омоноличивались цементным раствором, покрывались жидким стеклом и стеклотканью. Из таких элементов в скважине монтировался электронагреватель заданной длины. Для уменьшения перегрева грунта в верхней части массива предусматривались вставки с увеличенным диаметром стального стержня.

Применение обетонированных электродов и замена трансформаторных подстанций с КТПН-630 на КТПО-80, позволили использовать более низкие и регулируемые напряжения, резко снизить токи утечки и установить кондуктивный процесс теплообмена между электродами и грунтом.

Используя новую схему электроснабжения нагревателей удалось добиться стабильности режима их работы. Разброс мощностей нагревателей не превышал 15 %, что свидетельствовало о практическом отсутствии токов утечки.

Как показывает практика, параметры электрооттаивания - время работы нагревателей, радиус оттаянного грунта, шаг скважин - установленные расчетами (методика «Гидро-спецпроекта») являются ориентирами для основных технологических решений и экономических расчетов.

Многообразие геологических и мерзлотных условий приводило к необходимости уточнять и корректировать параметры в процессе проведения опытно-производственных работ. Например, только опытными работами было установлено, что зоны основания с водами - криопэгами, в которых в процессе оттаивания температура оставалась –2 °С, а грунты, находившиеся в мерзло-пластичном состоянии, поддаются цементации - задача оттаивания этих зон была снята.

Регулирование параметров в процессе оттаивания грунтовых массивов производилось изменением мощности электронагревателей в возможных пределах, изменением схем подключения нагревателей и продолжительностью оттаивания.

Продолжительность электроттаивания грунтов определялась на каждом участке - фрагменте основания с учетом влияния следующих факторов: начальной температуры и льдистости грунтов; наличием вод-криопэггов; мощностью электронагревателей, устойчивостью электроснабжения и пр.

По условиям оттаивания грунтов основания плотины были выделены два характерных участка: русловые и береговые (правый и левый). На береговых участках оттаивание производилось на полную глубину в грунтах естественного сложения, на русловых - в грунтах частично возведенного ядра и ниже расположенного основания. Отметим, что расход электроэнергии на вынужденный прогрев ядра был полезен для ускорения консолидации грунтов ядра. В таблице 1 приведены основные показатели оттаивания грунтов на характерных участках основания, где в числителе даны расчетные, а в знаменателе фактические показатели. Табличные данные подтверждают, что основой определения достоверных параметров являлись опытные работы.

Таблица 1.

| Наименование   | Участки (фрагменты) плотины |                      |                          |                        |
|--|-----------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|
|  | 8Л                          | 3П                   | 3П-А                     | 1П-П                   |
| Шаг нагревателей, м                                  | $\frac{5}{4,5 \div 5,5}$    | $\frac{6}{4 \div 7}$ | $\frac{5}{3,8 \div 4,3}$ | $\frac{6}{5 \div 6,5}$ |
| Объем оттаивания грунтов, тыс. м <sup>3</sup>        | $\frac{18,3}{17}$           | $\frac{35}{33}$      | $\frac{6,77}{6,77}$      | $\frac{14,0}{14,0}$    |
| Продолжительность работы нагревателей, сут.          | $\frac{120}{85}$            | $\frac{120}{287}$    | $\frac{120}{51}$         | $\frac{120}{110}$      |
| Удельный расход электроэнергии, кВт.ч/м <sup>3</sup> | $\frac{44}{10}$             | $\frac{35}{30}$      | $\frac{48}{31}$          | $\frac{30}{28}$        |
| Начальная температура грунтов, °С                    | -5,8÷+4,4                   | -1,9÷-5              | -4÷+2                    | -4÷-5,5                |
| Температура грунтов после оттаивания, °С             | -1÷+18                      | -2,9÷+1÷40           | -2÷+25                   | -2÷выше+10             |

Примечание: в числителе – расчетные показатели,  
в знаменателе – фактические показатели.

При оттаивании многолетнемерзлых пород велись наблюдения за их деформациями, температурным режимом и изменением характеристик оттаявших пород.

Тепловые осадки грунтов на левобережном участке под полами штолен были зафиксированы в пределах 1–1,7 м, что составляет 2–3 %. На правобережном участке у электронагревателей возникали просадочные воронки глубиной до 3–3,5 м и диаметром 4–6 м. Средняя величина осадок здесь составила 4–5 %.

Особый интерес представляли осадки оснований под возведенными противofильтрационными элементами плотин – ядра из суглинистых грунтов и обратных фильтров. Точность определения деформаций пород основания на контакте с ядром была достаточно грубой (осадки определялись при проходке скважин), но они все же позволили оценить величину осадок и подтвердить прогнозы разуплотнения суглинка в зоне контакта ядра с основанием. Минимальные осадки наблюдались у устоев бетонных сооружений гидроузла, где слой оттаявших грунтов имеет минимальную величину, наибольшие осадки (30–200 см) проявились у правого борта, где толща оттаявших пород достигала 20–30 м. В относительных величинах осадки составили 2,5–5 %.

Сравнительный анализ физических свойств грунтов до и после оттаивания приведен для двух фрагментов в таблице 2. Результаты лабораторных исследований показали, что после оттайки влажность грунтов основания понижается на 15–20 %, плотность повышается на 6–10 %.

Процесс консолидации грунтов еще не завершен, физико-механические характеристики их до постановки сооружений под напор будут улучшаться.

Таблица 2

| Фрагмент<br>и<br>№ слоя | До электрооттайки/ После электрооттайки |                               |                                    |                                    |                    |                     |
|-------------------------|---|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|---------------------|
|                         | W<br>%                                  | $\gamma$<br>г/см <sup>3</sup> | $\gamma_{ск}$<br>г/см <sup>3</sup> | $\gamma_{уд}$<br>г/см <sup>3</sup> | Коефф-т<br>порист. | Степень<br>водонас. |
| <u>Ф-8Л</u>             |   |                               |                                    |                                    |                    |                     |
| 12 а                    | 18,2/14,9                               | 2,09/2,18                     | 1,77/1,90                          | 2,76/2,76                          | 0,559/0,453        | 0,90/0,91           |
| 12 б                    | 16,8/14,7                               | 2,12/                         | 1,82/1,93                          | 2,83/2,83                          | 0,555/0,466        | 0,86/0,89           |
| <u>Ф-1П</u>             |   |                               |                                    |                                    |                    |                     |
| 12 а                    | 18,3/14,8                               | 2,08/2,25                     | 1,76/1,96                          | 2,78/2,78                          | 0,58/0,418         | 0,88/0,98           |
| 12 б                    | 15,1/12,8                               | 2,19/2,27                     | 1,9/2,01                           | 2,83/2,83                          | 0,489/0,408        | 0,87/0,89           |

В четвертой главе на примере создания противofильтрационных устройств плотин Вилуйской ГЭС-III рассматривается методика создания цементационной завесы в особых условиях, не имеющих примеров в практике гидротехнического строительства.

Отличительными особенностями создания цемзавесы являлись:

- устройство ее в послепостроечный период водоподпорных сооружений по окончании искусственного оттаивания основания и до принятия сооружениями напора воды водохранилища;
- проведение работ по инъекции полускальных пород основания в искусственно оттаянном массиве, ограниченных размеров;
- необходимостью выполнить восстановление сплошности зоны сопряжения грунтов ядра с основанием инъекцией цементных растворов, а также возможных нарушений сплошности ядра.

В практике гидротехнического строительства отсутствовал опыт инъекции полускальных пород с прослоями мелкодисперсных грунтов. Примеров проведения восстановительных работ в зоне контакта с ядром в процессе уплотнения основания в указанных выше условиях также не имелось. В результате все указанные проблемы можно было решить только на основе выполнения комплекса опытно-производственных работ.

Первый опытный полигон был создан на участке плотины «фрагмент 10Л». Проблема состояла в проверке возможности инъекции массивов, сложенных перемятыми до щебня, дресвы, суглинка породами, которые располагались между хорошо поддающимися инъекции прослоями доломитов и известняков.

Разведочным бурением и цементацией, выполненными в породах с амплитудой температур от  $-2^{\circ}\text{C}$  до  $+20^{\circ}\text{C}$  и влияния вод-криопэгов, охлаждавших разогретый грунт, было установлено, что в зонах с отрицательной температурой лед отсутствует и есть возможность начать опытно-производственные работы на всем участке фрагмента 10Л.

Опытными работами установлено следующее: окружающая массив мерзлота не влияет на результаты инъекции; массив находится в процессе продолжающейся после оттаивания консолидации; высокая поглощаемость в зонах с высокой трещиноватостью и пустотностью потребовала применения цементно-песчаных

растворов с переходом на последующих этапах на стабильные цементно-бентонитово-песчаные растворы с соответствующим регулированием давления в инъекционной системе в процессе производства работ.

Используя данные изысканий по пористости пород и фактических расходов растворов, было установлено, что часть объемов растворов (до 50 %) пошла на заполнение трещин и пустот в примыкающем мерзлом массиве, укрепив последний.

В комплексе опытно-производственных работ в зависимости от структурных особенностей грунтов применялись экономичные и хорошо зарекомендовавшие себя растворы: цементно-песчаные без и с добавкой бентонита; цементные и цементно-бентонитовые; для инъекции микротрещин и пустот мелкозернистых грунтов - бентонито-цементные. Решающим для качества цементации являлось умение определить моменты перехода от одного раствора к другому с выбором параметров давления в инъекционной системе. Все это обеспечивалось навыком и опытом исполнителей работ и по существу являлось своего рода профессиональным искусством и творчеством.

Цементационные работы по созданию противодиффузионной завесы на участках частично возведенных лево и правобережных плотин выполнялись с поверхности прикрытого утепляющим слоем песчано-гравийных грунтов ядра. Инъекция растворов производилась по скважинам с обсадными трубами в пределах ядра способом нисходящих зон с установкой тампонов в устье труб. В главе подробно излагается весь процесс инъекции с пояснением необходимых изменений параметров I, II и III очередей инъекции.

Качество цемзавесы после завершения работ проверялось контрольными испытаниями на водопоглощаемость в соответствии с действующими нормами, а также повторными испытаниями, проводимыми экспедицией № 13 Ленгидропроекта. Анализ контрольных испытаний показал, что завеса I очереди в основании левобережной плотины соответствует заданным критериям, завеса в основании правобережной плотины требует усиления.

В итоге, цементацией оттаянных грунтов основания их водопроницаемость снизилась в среднем в 50 раз, с  $K_f$  от 50 м/сут до 1 м/сут. После оттаивания грунтов основания под воздействием водохранилища и выполнения завесы II очереди, заданная плотность противодиффузионной завесы может быть обеспечена по всему водоподпорному фронту.

Научный и практический интерес вызывает поведение основания на контакте ядра из суглинка при принятом методе создания противодиффузионных устройств. В четвертой главе отведено значительное внимание оценке сплошности и фильтрационной прочности ядра.

Принятый метод устройства цементационной завесы в основании плотины не исключает нарушения сплошности ядра на контакте его сопряжения с основанием и нарушения сплошности самого ядра из-за возникновения в нем трещин разрыва, вызванных неравномерными осадками основания.

После оттаивания и цементации пород контрольными исследованиями установлено следующее:

- осадки пород основания наблюдались на всех участках основания плотин;
- были отмечены осадки поверхности ядра;
- суммарные относительные осадки ядра и пород находились в пределах от 2 % до 5 %;
- образования трещин в ядре не обнаружено и нарушений сплошности ядра не произошло, ядро сохранило первоначальную низкую водопроницаемость ( $K_f \leq 1$  м/сут);

- зона разуплотненного суглинка ядра на контакте с основанием была надежно зацементирована; контрольными скважинами были вскрыты слои цементного камня с суглинком и коренными породами мощностью до 1-2 м;

Сохранение сплошности ядра в условиях осадок пород основания предположительно можно объяснить следующими факторами.

Консолидация оттаявших пород основания в достаточно узкой полосе, соприкасающихся с твердомерзлыми массивами, происходила медленно, цементация замедлила процесс консолидации пород, хотя и не остановила его полностью, поэтому тепловые осадки пород не достигли максимальных значений. Не исключалось возможность опирания ядра на неоттаявшие участки коренных пород, примыкающих к оттаянной зоне, и возникновение арочного эффекта. Такая гипотеза может иметь место, так как фактическая ширина талой зоны в процессе оттаивания термонаблюдениями не определялась.

Плотное связанное ядро из суглинка не могло реагировать и следовать за отдельными неровностями пород основания, оно опиралось на них подобно достаточно жесткому элементу, сохраняя свою целостность и сплошность, осредняя осадки основания.

В заключительной части главы сделана попытка объяснить отсутствие трещин в ядре расчетными методами, пользуясь разработками кафедры подземных зданий и сооружений, оснований и фундаментов Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета.

Учитывая, что специальные испытания грунтов ядра в условиях нагружения растяжением–сжатием не проводились, в работе выполнены расчеты по упрощенной методике только для гребня ядра с использованием метода оценки прочности в рамках модели Кулона – Мора.

Для оценки прочности ядра важна степень достоверности НДС. Для грунтовой плотины, строящейся и эксплуатируемой в климатических условиях Крайнего Севера, обеспечить достоверный расчет НДС чрезвычайно трудно. Динамика температурных полей, процессы интенсивной оттайки при заполнении водохранилища, поэтапное возведение сооружений исключают возможность получения результатов расчета с необходимой степенью достоверности для определения формы разрушения грунта сдвигом или разрывом. Условность результатов расчетов НДС оправдывает применение упрощающих предпосылок.

Проверка возможности трещинообразования в грунтах ядра разрывом заключалась в определении состояния массива (допредельное или предельное) в области с наибольшими неравномерными осадками, полагая при этом, что трещины разрыва возможны только после наступления предельного состояния на сдвиг. Необходимые для расчета значения напряжений  $\sigma_z$ ,  $\sigma_x$ ,  $\tau_{xz}$  устанавливались для зоны, ограниченной низким уровнем нагружения. В рассмотренном случае исследовалась область гребня ядра с утепляющей пригрузкой толщиной 3,5 м с общей глубиной  $z_0$  до 6÷8 м и уровнем нагружения  $\sigma_z \leq 0,1$  Мпа. Указанные ограничения позволили принять допущение и о линейной зависимости коэффициента пористости от напряжений ( $e = f(\sigma)$ ), и, следовательно, о постоянстве для всей глубины  $z_0$  модуля деформации, о линейном изменении модуля сдвига от  $G_{\max} = E / 2 (1 + \nu)$  на глубине  $z_0$  до  $G = 0$  при  $z_0 = 0$ , а также о линейном распределении напряжений  $\sigma_z = \gamma_0 z$ ,  $\sigma_x = \xi \sigma_z$  и  $\tau_{xz} = \gamma_{ij} G$ . Расчетная схема ограничена условием применения коэффициента бокового давления:

$$\xi = (\sigma_x / \sigma_z) = \frac{\nu}{1 - \nu} \text{ – для допредельного состояния и}$$

$\xi' = \text{tg}^2 (45 - \varphi/2)$  – для предельного, полагая поперечные деформации  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$  пренебрежимо малыми.



В качестве основного влияющего фактора на состояние грунта принимается деформация сдвига  $\gamma_{ij} = \Delta S / l$ , как следствие неравномерной осадки гребня плотины в продольном направлении.

Исследовался участок гребня правобережной плотины с максимальной разностью осадок, равной  $\Delta S = 0,4$  м на участке  $l = 12,4$  м и определившее  $\gamma_{ij} = 0,0322$ .

С учетом принятых обозначений и допущений условие Кулона-Мора

$$\sin \theta_{\max} = \left[ \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2} / (\sigma_z + \sigma_x + 2C \operatorname{ctg} \varphi) \right] \leq \sin \varphi$$

было записано в виде:

$$\Pi = [\gamma_0 z (\xi + 1) + 2C \operatorname{ctg} \varphi] \sin \varphi - \{[\gamma_0 z (\xi - 1)]^2 + 4(\gamma_{ij} G)^2\}^{1/2} \geq 0$$

Расчеты выполнены с учетом проектных параметров прочности и деформируемости ( $C = 0,015$  МПа,  $\varphi = 26^\circ 45'$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $E_d = 3,53$  МПа,  $G = 1,307$  МПа – все нормативные значения).

Установлено, что для фактического состояния гребня ядра с утепляющей пригрузкой состояние допредельное, т.е. возможность образования трещин разрывом маловероятна. Отметим, что для случая отсутствия утепляющей пригрузки состояние по расчету получено несколько «запредельное»,  $\Pi = 0,01 \div 0,02 > 0$ .

Более обоснованные расчеты проверки грунтов ядра на трещинообразование разрывом предполагается выполнить в дальнейшей работе, предусматривающей опытно-лабораторные испытания грунтов ядра в условиях нагружения растяжением-сжатием.

В заключительной части главы дана экономическая оценка устройства цемзавесы в условиях строительства Вилюйской ГЭС-III в сравнении с альтернативной конструкцией противифльтрационного устройства на правобережном участке плотины – буробетонной стенки. Стоимость буробетонной стенки, приведенная к  $100 \text{ м}^2$  напорного фронта, в 1,7 раза превышает стоимость цементационной завесы.

### Основные выводы.

1. Разработан и впервые осуществлен на строительстве каменно-земляных плотин Вилюйской ГЭС-III послепостроечный метод создания противифльтрационных устройств с искусственным оттаиванием многолетнемерзлых полускальных глинисто-карбонатных просядочных пород основания после возведения тела плотины.
2. Разработаны и решены технологические проблемы электрооттаивания многолетнемерзлых грунтов на большую глубину, обводненных подземными водами-криопэгами с отрицательными температурами ( $- 2 \div - 3,2$  °С). Способ оттаивания мерзлых пород обетонированными сборными электронагревателями омического типа в весьма сложных геокриологических условиях можно характеризовать как универсальный способ и рекомендовать его применение на других объектах строительства.
3. В результате выполнения масштабных разведочных и опытно-производственных работ в условиях, не имеющих аналогов, отработана и осуществлена технология инъекции предварительно оттаянных полускальных карбонатно-глинистых пород, что позволило создать противифльтрационную завесу с заданной плотностью.
4. Восстановление разуплотненной зоны суглинка ядра на контакте с оттаявшими породами основания способом инъекции цементных растворов дало положительные результаты и может быть рекомендовано для применения на других объектах гидротехнического строительства.
5. Ядро из суглинистых грунтов, несмотря на осадки основания, сохранило сплошность и первоначальную водопроницаемость. Образования трещин внутри и на

гребне ядра не наблюдалось, хотя по вариантным расчетным прогнозам возникновение трещин на гребне ядра не исключалось. Достоверное обоснование поведения ядра может быть получено в результате продолжения опытных, научно-исследовательских и лабораторных работ.

6. Для организации систематических наблюдений за поведением плотины и ее элементов установлена контрольно-измерительная аппаратура, которая по специальной программе позволит анализировать и обобщать результаты наблюдений.
7. Разработанная и внедренная технология возведения земляных плотин Вилюйской ГЭС III в сложных природных условиях не имеет аналогов в мировом гидротехническом строительстве. Ценный научно обоснованный опыт, собранный в диссертации существенно обогащает и развивает науку о строительстве безопасных гидротехнических сооружений в суровых условиях Крайнего Севера.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Шерман М.М., Фрумкин В.Н., Федосеев В.И., Шишов И.Н. «Совершенствование способов создания цементационных завес в вечномерзлых скальных основаниях гидротехнических сооружений». Гидротехническое строительство, № 8, 2001 г.
2. Шерман М.М., Фрумкин В.Н.. «О строительстве гидроузла на многолетнемерзлом полускальном основании». Гидротехническое строительство, 2003 г. (в печати).
3. Шерман М.М., Цвик А.М., Толошинов А.В. «Строительство Вилюйской ГЭС-III». Гидротехническое строительство, № 8, 1997 г., с. 29.
4. Шерман М.М., Фрумкин В.Н., Цвик А.М., Федосеев В.И., Шишов И.Н., «Способы создания цементационных завес в вечномерзлых скальных основаниях гидротехнических сооружений», № 11, 2002 г.



