

*На правах рукописи*

ФРУМКИН

Владимир Наумович

ЦЕМЕНТАЦИОННЫЕ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ЗАВЕСЫ В ОСНОВАНИЯХ  
НАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ  
НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ (НА ПРИМЕРЕ КОЛЫМСКОЙ ГЭС)

Специальность 05.23.07 – Гидротехническое строительство

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2001

Диссертация выполнена в Санкт-Петербургском  
государственном техническом университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

В.А.Пехтин

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

И.М.Васильев

кандидат технических наук, ст.н.с.

Ю.Д.Чертыков

Ведущая организация – ОАО "ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева".

Защита состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2001 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.15 в Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Гидрокорпус-2 (ПГК), ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке СПбГТУ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

А.Е.Андреев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Наука и инженерная практика ведут большую работу по освоению и использованию природных ресурсов Крайнего Севера, Сибири и Северо-Востока, районов, которые остаются основой экономического могущества Российской Федерации.

Россия является одной из ведущих стран, развивающих северную гидроэнергетику и уже внесла большой вклад в мировой опыт строительства в особо сложных районах по географическим и геологическим условиям.

Строительство на Крайнем Севере в условиях вечномерзлых грунтов, в отсутствии развитых промышленных центров, недостатка постоянных надёжных связей ставит особые задачи по выбору оптимальных конструктивных решений сооружений, технологии их возведения и организации работ.

Возведению надёжных напорных гидротехнических сооружений и в частности плотин, во многом способствуют качественно выполненные противofильтрационные цементационные завесы в их основании.

Наблюдения показывают, что к настоящему времени после длительного срока эксплуатации на многих гидротехнических сооружениях, построенных на многолетнемерзлых основаниях имеют место нарушения фильтрационной прочности оснований и элементов напорных сооружений.

Следует совершенствовать технологию, основываясь на имеющемся опыте строительства на Крайнем Севере, на анализе результатов научно-исследовательских работ, выполненных для обоснования проектов конструкций цементационных завес с предварительным оттаиванием основания, наилучшим образом учитывать местные условия, оперативно улучшать организацию работ при изменяющихся теплофизических характеристиках грунтов основания. Решению отмеченных организационно-технологических проблем и их научному обоснованию посвящена рассматриваемая работа.

Работа выполнялась в соответствии с государственной программой по теме 04.02. М 2. проблема 0.55.08. «Разработать и внедрить новые технологические решения и технологию строительства гидроэлектростанций в сложных природно-климатических условиях».

Цель работы. На основе имеющегося практического опыта обосновать методы возведения цементационных завес при строительстве напорных ГЭС в условиях вечной мерзлоты. Показать эффективность электрооттаивания, определить его продолжительность, и методы контроля оттаивания с учетом особенностей места строительства.

Показать, как в конкретных условиях обоснованно выбрать конструкцию и выполнить надёжную цементационную завесу, в том числе под напором в условиях вечномерзлого основания.

Обоснованно выбрать состав инъектируемых растворов, дать рекомендации по тем или иным добавкам в производственных условиях.

Научная новизна диссертации заключается в том, что в ней впервые в практике гидротехнического строительства предложена обоснованная технология возведения надёжной цементационной завесы в условиях вечномерзлых оснований.

В предложенной технологии увязано влияние эффективной контролируемой электрооттайки, времени цементации, конструкции цементационной завесы, выбор состава цементационного раствора.

На примере Колымской ГЭС даны обоснованные рекомендации о выборе способа оттайки, количества и мощности электронагревателей, предложена организация опытно-

фильтрационных исследований, позволяющая следить за проницаемостью изменяющейся по глубине пород, обоснована конструкция цемзавесы, в том числе при выполнении работ под напором.

Сделан обоснованный вывод, что теоретические расчетные модели не дают такого надёжного обоснования конструкции цемзавесы, выбора способа оттайки вечномерзлого основания, как опытные научно-экспериментальные исследования на месте строительной площадки и анализ опыта возведения цемзавес в натуральных условиях.

Практическая ценность результатов, изложенных в диссертации, заключается в том, что в ней, опираясь на опыт строительства, на многочисленные опытно-исследовательские работы в производственных условиях, сформулированы основополагающие принципы технологии возведения цементационных завес напорных гидротехнических сооружений на вечномерзлых скальных породах.

Особенностью предложенной научно обоснованной технологии является то, что она учитывает опыт создания цементационной завесы в условиях Колымской ГЭС, где вечномерзлые скальные породы основания после оттаивания имели высокую водопроницаемость.

Научно-методические предложения по технологии и организации возведения цемзавес, изложенные в диссертации, опираются на многочисленные опытно-производственные работы по оттайке, водопоглощению и цементации пород. Это позволяет сформулировать научно-обоснованные нормативные требования для создания надёжных напорных сооружений в сложных геологических условиях и развивать мало изученный раздел науки о цементационных завесах в гидротехническом строительстве.

Научно-обоснованная технология и организация цементационных работ с систематическим контролем позволила оценить эффективность цемзавесы на различных этапах её возведения. Оценить влияние изменения состава цементационного раствора, эффективность добавок: опилки, жидкое стекло, соль; применение цементационно-бентонитовых растворов.

Апробация работы: Результаты выполненной работы многократно обсуждались на технических совещаниях, технических и научных Советах АО Ленгидропроект, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, на научных семинарах СПбГТУ, МЭИ, СПбГАСУ.

По теме диссертации автором опубликовано 6 работ.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего ... наименований.

Работа содержит ... страниц машинописного текста, ... рисунков и ... таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы и ее научная новизна. Анализируются и обобщаются материалы по совершенствованию конструкций и технологий возведения плотин из местных грунтовых материалов, а также научные исследования, выполненные ВНИИГом, его Сибирским отделением, НИО АО Ленгидропроект, СПбГТУ (ЛПИ), СПбГАСУ (ЛИСИ), институтами ВодГЕО и Гидроспецпроект, представленных в отчетах, в книгах и статьях инженеров и ученых, таких как В.А.Авдеев, Г.Ф.Биянов, А.К.Бугров, И.М.Васильев, Ю.С.Васильев, В.И.Вуцель, С.С.Вялов, А.Л.Гольдин, Б.Н.Далматов, В.Н.Жилеков, Ю.К.Зарецкий, А.А.Каган, О.А.Когодовский, В.В.Колеганов, Н.Ф.Кривоногова, Я.А.Кроник, Л.И.Кудояров,

С.А.Кузьмин, В.Л.Куперман, В.Г.Мельник, И.С.Моисеев, Р.М.Нарбут, М.П.Павчич, В.А.Пехтин, Ю.П.Правдивец, В.Г.Радченко, Л.А.Розин, Л.Н.Расказов, Д.Д.Сапегин, А.А.Серов, С.Б.Ухов, В.И.Федосеев, М.П.Федоров, Ю.И.Фриштер, А.В.Чернобаева, Ю.Д.Чертыков, И.Н.Шишов и других специалистов, внесших большой вклад в отечественное гидротехническое строительство.

В первой главе излагаются особенности вечномерзлых грунтов, от учёта которых зависит длительная безопасная работа цементационных завес. На ряде гидротехнических объектов, введенных в эксплуатацию десятки лет назад, возникли серьёзные проблемы, связанные с деградацией вечной мерзлоты в основании сооружений.

Представляет большой интерес накопленный опыт проектирования и возведения цементационных завес на вечномерзлых основаниях особенно поведение пород при растеплении. Правильный учёт поведения пород и их особенностей накладывают новые требования к проведению изысканий, организации полевых исследований к выбору расчётных параметров.

Одной из главных инженерно-геологических особенностей вечномерзлых пород является льдистость.

Льдистость вечномерзлых скальных пород изменяется в соответствии с изменением трещиноватости. Кристаллические породы, особенно в верхних слоях обычно выветрены и обладают льдистостью порядка 1...3%. С глубины около 50м они являются типично морозными породами с отрицательной температурой и не имеющими льда.

Осадочные толщи наиболее часто содержат мощные ледяные включения. Гнезда льда могут достигать толщины до 0,5м. По тектоническим зонам дробления мощность ледяных жил может достигать до 0,2м.

Наибольшей льдистостью отмечаются глинистые сланцы. В карбонатных карстующихся породах трещины заполненные льдом шириной более 0,1м отмечались на глубине до 300м.

При промерзании скальных пород в водонасыщенном состоянии наблюдается **распученность**, т.е. увеличение объёма пород. Распученность может наблюдаться на любой глубине по трещинам тектонического дробления.

Есть много показательных примеров отрицательного проявления распученности вечномерзлых грунтов. Оттаивание распученных пород, используемых в качестве оснований под сооружения вызывает осадки фундаментов, не зависящие от нагрузок на основание. Осадки, как правило, нарастают в соответствии с развитием зоны оттаивания. При этом осадки могут достигать нескольких сантиметров на метр глубины.

Фильтрационные свойства вечномерзлых пород имеют решающее значение не только при определении необходимости противофильтрационных устройств, но и при укрепительных мероприятиях в основании сооружений.

Напорные сооружения, возведенные на вечномерзлых основаниях после оттаивания основания в ряде случаев были не способны создать водохранилище и удерживать напор. Фильтрационные потери бывают столь высоки, что на порядок превышают проектные предположения (плотина Билибинской АЭС). Дополнительные изыскания позволили уточнить гидрогеологическую обстановку, существенно усилить противофильтрационные устройства - создать 3-х рядную цемзавесу. Однако удалось наладить работу подпорного сооружения путём больших затрат.

Подпорные сооружения Сытыканского гидроузла построены по мерзлотному принципу. Мерзлое состояние плотины и бортовых примыканий поддерживалось

мерзлотной завесой воздушного типа. Возникли осложнения после продолжительного периода эксплуатации из-за образовавшегося талика под бетонным водосбросом. Фильтрация воды через трещины в бетоне распространилась в основание. Талик развивался как в глубину основания, так и по фронту. Суффозионные процессы проявились в грунтовых напорных сооружениях и в оттаившем основании. Появились трещины и провалы на гребне плотины.

Для ликвидации аварийного состояния на гидроузле цементация была признана ненадёжным мероприятием из-за возможности нарушений контакта с мерзлотой, т.к. в проницаемых грунтах через неплотности в цемзавесе на контакте с вечномерзлым грунтом образуются фильтрационные токи и смыкание завесы с вечномерзлым грунтом окажется невозможным. В одном из вариантов ликвидировать в талых грунтах фильтрацию предполагается устройство глинобетонной стенки заглубленной в мёрзлый грунт.

Более надёжным мероприятием считается устройство противофильтрационной завесы и устройство мерзлотной завесы перекрывающей весь возникший талик и обеспечивающий надёжное сопряжение с вечномерзлым грунтом основания и сооружения.

На приведенных примерах можно убедиться насколько важно на проектной стадии объективно оценить сложность инженерно-геологической обстановки и не допускать ошибок в оценке фильтрационных процессов, которые могут развиваться и привести к непредсказуемым последствиям.

Следует отметить, что скорость движения фильтрационного потока в основании не следует оценивать по среднему коэффициенту фильтрации. Необходимо тщательно учитывать возможную неоднородность основания. Такой учёт особенно необходим при возведении мерзлотных завес. Обычными методами выполнить замораживание оснований при больших скоростях движения фильтрационного потока невозможно. Одним из способов создания благоприятных условий для замораживания грунтов является цементация зон с большими коэффициентами фильтрации.

В условиях Сытыканского гидроузла скорость воды в трещиноватых зонах на несколько порядков отличалась от средних скоростей движения фильтрационного потока в основании. После цементации этих зон коэффициенты фильтрации выровнялись и были в пределах 0,5 ..... 1,0м/сут. Из рассмотренного примера видно, что цементация может быть эффективна не только как основной противофильтрационный фрагмент, но и ответственный вспомогательный элемент, позволяющий создать более однородное основание при возведении напорного сооружения.

Во второй главе излагаются способы создания цементационных завес в вечномерзлых основаниях гидротехнических сооружений. В зависимости от инженерно-геологических, геокриологической и фильтрационной особенностей скального основания цементация может выполняться при отрицательных температурах в природном состоянии, или после оттаивания основания.

Цементация в вечномерзлых грунтах в неоттаявшем состоянии в условиях реального строительства не может быть окончательной, т.к. в скальном массиве всегда имеются трещины и в них всегда имеется лёд. Хотя льдистость основания может быть незначительной, как правило под воздействием фильтрационного потока лёд растает, что может потребовать проведения повторной цементации.

Чаще всего в реальных условиях строительства оттаивание вечномерзлых оснований наступает вследствие принудительного введения тепла в вечномерзлый грунт до наполнения водохранилища.

Нормативно считается, что цементацию следует проводить до заполнения водохранилища, если прогнозируемая скорость движения фильтрационного потока по трещинам в напорном состоянии превышает 2400м/сут. Если скорость фильтрации меньше можно выполнять цементацию основания после заполнения водохранилища и оттаивания мерзлых грунтов под действием фильтрационного потока. Независимо от фильтрационной способности оттаявшего вечномёрзлого основания цементацию следует выполнять до заполнения водохранилища, если:

1. осадки конструкции при его оттаивании превосходят допустимые для сооружения, воспринимающего напор;
2. конструкция сооружения не позволяет выполнить цементацию после заполнения водохранилища;
3. конструкция сооружения требует по его устойчивости и прочности безотказной работы дренажа (гравитационная плотина).

Особый интерес представляет опыт создания цемзавес до заполнения водохранилищ. В настоящее время «Ленгидропроектом» и «Гидроспецпроектом» на основании опыта строительства Колымской, Вилюйской ГЭС-III разработаны и постоянно совершенствуются способы оттаивания вечномёрзлых грунтов.

Оттаивание грунта при длинах завесы измеряемой сотнями метров осуществляется, как правило, участками. Источниками тепла служат: вода или электроэнергия (гидрооттаивание, пароттаивание и электрооттаивание).

При гидрооттаивании в скважины опускаются трубы диаметром 5-6 см с прорезями в нижней части (гидроиглы). Затрубное пространство уплотняется гравием или крупнозернистым песком. С помощью насосов в гидроиглы под давлением подается вода, которая фильтрует в затрубном пространстве снизу вверх. Гидроиглы объединяются в системы по сетке равносторонних треугольников, шаг скважин порядка 6м. Время оттаивания зависит от температуры воды.

При пароттаивании схема подачи тепла в массив вечномёрзлого грунта аналогична схеме при гидрооттаивании. При пароттаивании сложно обеспечить равномерность подачи тепла по вертикальному сечению скважины. В горизонтальном сечении некоторое время имеют место зоны перегрева и мерзлоты. Обычно в это время подачу тепла прекращают. Введенного тепла достаточно, чтобы мерзлые зоны оттаяли без дополнительной подачи пара, за счёт кондуктивного перераспределения тепла. Несоблюдение такой технологии приводит к перерасходу пара, необходимого по теплофизическим параметрам грунта. Для поддержания расчётного давления необходим определённый расход пара. Иногда в производственных условиях давление пара в устье иглы оказывалось меньше расчётного из-за малого расхода пара. Пар, конденсируясь в верхней части иглы, задерживает тепло в верхней зоне грунта, перегревая её. Нижняя зона прогревается в этом случае по схеме гидрооттаивания горячей водой. При пароттаивании очень сложно обеспечить необходимое количество пара для пароттаивания вечномёрзлых грунтов. Поэтому этот способ имеет ограниченное применение.

Наибольший эффект от пароттаивания имел место на Аркагалинской ГРЭС, где для оттаивания вечномёрзлого грунта перед цементацией применялся пар турбогенератора, и проблем с обеспечением расчётной потребности пара не возникало.

При электрооттайке вечномёрзлого грунта используются электронагреватели. Электронагреватели помещаются в скважины и представляют собой токовод из арматурной стали диаметром 11 ... 14 мм.

Омические электронагреватели могут работать в разных режимах. При малой мощности нагревателя оттаивание происходит в режиме кондуктивной теплопередачи. Температура нагревателя может достигать сотен градусов. Вокруг скважины образуется перегретая зона.

Электрооттайка вечномёрзлых грунтов обладает преимуществом по сравнению с гидро- и пароттайкой:

1. выше эффективность выработанного тепла;
2. мощность нагревателя может быть по глубине переменной;
3. параметры нагревателей могут выбираться в широком диапазоне, в зависимости от местных условий и от изменения теплофизических характеристик обогреваемого массива.

Многолетний производственный опыт позволяет сформулировать наиболее важные технологические и организационные признаки для применения способов оттаивания вечномёрзлых грунтов:

**Гидрооттаивание рекомендуется в случаях, когда:**

- имеется надёжный источник водоснабжения с температурой воды не ниже 12 ... 16°C;
- водопроницаемость обогреваемого массива характеризуется коэффициентом фильтрации не менее 5 ... 10 м/сут;
- допустимо ведение работ по схеме организации строительства только в тёплый период года;
- гидрооттаивание не вызовет нарушений устойчивости сооружений или откосов на соседних площадках.

**Парооттаивание рекомендуется:**

- при наличии надёжного источника пароснабжения, производительность которого в 1,5 ... 2 раза превышает расчётную потребность пара участка оттаивания с принятыми теплофизическими характеристиками;
- при обеспечении возможности регулирования параметров пара;
- при недопустимости гидрооттаивания;
- при невозможности применения по каким-то причинам электрооттаивания.

**Электрооттаивание – универсальный способ.**

Ограничения по его применению могут быть связаны с обеспечением безопасных условий ведения работ на площадке и наличием мест для размещения трансформаторов, питающих электронагреватели.

Для получения данных о фактическом процессе оттаивания необходимо проводить температурные наблюдения, которые предоставляют возможность оперативно контролировать изменения температурного состояния массива и регулировать изменения температурного состояния массива от изменения теплофизических характеристик обогреваемого массива.

Наблюдения выполняются с помощью термодатчиков. При устройстве термоскважин особое внимание следует уделить герметичности труб, фиксировать начальное температурное состояние массива. Следует учитывать, что из-за проходки температурной скважины температурный режим массива восстановится лишь через 10 ... 15 суток. Температурные скважины устраиваются раньше, чем скважины с электрообогревом.



Технологические условия и основные принципы технологии цементации с предварительной оттайкой массива лучше всего формулировать после проведения в производственных условиях работ на опытном участке цементации. Объективную информацию можно получить на участке ограниченных размеров, если его ширина принята не менее трёх расстояний между скважинами, а длина – не менее глубины цементационной завесы.

Основные технологии цементации вечномерзлого скального массива с предварительной оттайкой впервые были сформулированы на строительстве Нюрнгринской ГРЭС. В условиях малоледистого основания оттаивание выполнялось электрическим способом с использованием омических нагревателей. Нагреватели опускались в скважины 150мм. После спуска нагревателей скважины засыпались шламом. Это улучшало работу нагревателей, т.к. из-за понижения температуры нагревателей улучшалась «отдача» тепла. Осмотр извлеченных нагревателей, проработавших более месяца показал, что деревянные изоляторы хорошо сохранились, температура нагревателей не превышала 250°С. В ходе электрооттаивания отмечено, что температурные скважины быстро реагировали на включение нагревателей. Это подтверждает данные о низком содержании льда в грунте. Выполненные исследования имели исключительную важность для термоконтроля за процессом оттаивания, что давало возможность оперативно вмешиваться в технологический процесс и, что особенно важно оперативно уточнять температурно-физические характеристики и корректировать расчётные зависимости.

В результате было показано, что цементация слабопроницаемого вечномерзлого основания с предварительной оттайкой возможна.

Низкое льдосодержание грунтов (льдистость 1 ... 2%) привело к мысли провести эксперимент по цементации песчаников без предварительной оттайки. На скважинах без предварительной оттайки удельный расход цемента примерно на 20% меньше, чем в скважинах с предварительной оттайкой. Этот эксперимент позволяет отметить, что при малой льдистости эффект цементационной завесы практически одинаков с применением электрооттайки и без неё.

В заключении главы отмечается, что ошибки, допущенные при выполнении цементационных завес в вечномерзлых грунтах с оттайкой массива, были связаны с отсутствием надлежащего опыта, недостаточным представлением об изменении свойств вечномерзлых грунтов при оттайке, их теплофизических свойств и недостатках методики расчёта, не позволяющей быстро и просто корректировать процесс оттайки при меняющихся условиях производства работ.

Для дальнейшего развития и совершенствования технологии выполнения цементации в вечномерзлых грунтах необходимо накапливать производственный опыт, совершенствовать исследования в натуральных условиях, развивать методику расчёта, на основе которой можно управлять процессом оттаивания, при меняющихся условиях технологии производства работ.

В третьей главе излагается методика расчётного обоснования параметров оттаивания вечномерзлых грунтов. В состав обоснования входит: определение шага и мощности нагревателей, время оттаивания, расход потребляемой энергии. К расчёту параметров оттаивания особенно на начальном этапе проектирования не следует относиться излишне строго. Нет методики, способной учесть всё многообразие условий, в которых выполняется оттаивание, да и теплофизические характеристики грунтов весьма и весьма приближенны.

Результаты расчёта следует расценивать как ориентир, позволяющий организовать работу нагревателей без аварийных ситуаций, оценить стоимость работ.

С другой стороны на месте строительства расчётные параметры могут уточняться в процессе производства работ.

Электрооттаивание требует тщательных наблюдений за термофизическими параметрами, а расчётная методика должна помогать оперативно корректировать проектные предположения и управлять сложным и изменяющимся процессом электрооттайки.

В настоящее время по методике разработанной в СОНИИОСП время работы одиночного нагревателя при заданном радиусе оттаивания определяется по зависимости:

$$\tau = 1,59R^2 \sqrt{\frac{\sigma \cdot \omega}{\alpha \cdot P_n}},$$

где  $\tau$  – время работы нагревателя (час);

$R$  – радиус оттаивания грунта (м);

$\sigma$  – теплота фазового перехода лёд – вода;

$\omega$  – льдосодержание мерзлого грунта (льдиность объёмная

– отношение объёма всех видов льда в мерзлом грунте к объёму оттаиваемого массива)

$\alpha$  – коэффициент теплопроводности талого грунта (м<sup>2</sup>/ч);

$P_n$  – удельная мощность нагревателя, кВт/м;

Методика связывает зависимость друг от друга трёх параметров ( $\alpha$ ,  $P_n$ ,  $\tau$ ). Представляется возможность на основании субъективного опыта назначая два параметра – получать третий, учитывая в основном тепло затраченное на таяние льда.

В институте «Гидроспецпроект» разработана методика расчёта всех трёх параметров (или двух при одном заданном), оптимальных для конкретных теплофизических свойств грунта. Методика учитывает нормативы по экономической эффективности, действующие в условиях плановой экономики. Дополнительно учтены капитальные затраты на приобретение бурового оборудования, затраты на обслуживание площадок на период работы нагревателей. Разработана программа для расчёта тепловых полей на ПЭВМ, при оттаивании (замораживании) грунтов. Авторы – инженер П.У.Пониматкин, программист инженер И.В.Булатов.

Использование программ позволяет осуществить многовариантное проектирование, снизить трудоёмкость и стоимость проектирования, выбрать оптимальный вариант при заданных теплофизических параметрах грунта.

В производственных условиях работа нагревателей, может существенно отличаться от заложенных в проект. Теплофизические характеристики грунтов при проходке многочисленных скважин могут уточняться. На месте строительства, для определения рабочих параметров нагревателей и степени их отличия от проектных следует производить пробное включение электронагревателей. После пробного включения предоставляется возможность подкорректировать фактические параметры, как нагревателей, так и теплофизические характеристики всей системы. Для оперативного управления процессом электронагревания при уточнённых параметрах и возможных технологических изменениях необходима корректировка процесса. Для этого целесообразно использовать другую расчётную модель (см. расчётную схему).



Особенность предлагаемой расчетной модели заключается в том, что в ней учитывается неравномерность распределения температуры в оттаиваемом массиве при работе электронагревателей.

В диссертации принят закон изменения температуры в оттаиваемом массиве в виде:

$$t = T_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^2$$

где  $T_0$  – температура ветви нагревателя ( $^{\circ}$ , С)

$r$  – расстояние от центра массива, от электронагревателя, до рассматриваемого сечения (м)

Тепло, затраченное на подогрев до  $0^{\circ}$  вечномерзлого грунта ( $\theta_1$ ) и на подогрев льда ( $\theta_2$ ) равны:

$$\Theta_1 = 2(1 - \omega)\pi l C_m \int_0^R r \left(1 - \frac{r}{R}\right)^2 dr;$$

$$\Theta_2 = 2\omega\pi l c_l \int_0^R r \left(1 - \frac{r}{R}\right)^2 dr.$$

Тепло необходимое для фазового перехода лед-вода ( $\theta_\phi$ )

$$\Theta_\phi = 2\gamma\omega\pi R l \sigma,$$

Тепло для разогрева грунта ( $\theta_3$ ) и воды ( $\theta_4$ ) до заданной положительной температуры равно:

$$\Theta_3 = 2(1 - \omega)\pi l C_T \int_0^R r \left(1 - \frac{r}{R}\right)^2 dr;$$

$$\Theta_4 = 2\omega\pi l c_e \int_0^R r \left(1 - \frac{r}{R}\right)^2 dr.$$

Здесь  $l$  – глубина обогреваемого массива (м);

$C_m, C_l, C_T, C_e$  – объемная теплоемкость, соответственно, мерзлого грунта, льда, талого грунта и воды (ккал/м<sup>3</sup>гр)

$\gamma$  – плотность льда (т/м<sup>3</sup>)

После интегрирования:

$$\Theta_1 = \frac{1}{6}(1 - \omega)\pi R^2 l C_m T_0,$$

$$\Theta_2 = \frac{1}{6}\omega\pi R^2 l c_l T_0,$$

$$\Theta_3 = \frac{1}{6}(1 - \omega)\pi R^2 l C_T T_0,$$

$$\Theta_4 = \frac{1}{6}\omega\pi R^2 l c_e T_0 r.$$

Для проверки принятого закона распределения температуры внутри оттаиваемого массива вечномерзлого грунта выполнен расчет времени оттаивания основания под водоприемник Колымской ГЭС. На этом участке водоприемника велись наблюдения за

изменением температуры при электронагревании в течении продолжительного времени по скважинам, оборудованным термодатчиками.

При заданной мощности электронагревателей (0,5 кВт) принятых теплофизических характеристик грунта ( $C_m=1700$  ккал/м<sup>2</sup> и  $C_t=2200$  ккал/м<sup>2</sup>), объемной льдистости  $\varpi = 0,1$  (10%) расчетное время оттаивания и среднее время оттаивания по десяти скважинам практически совпадают (60 дней).

Выполненные расчёты показывают, что дальнейшее совершенствование методики расчёта электрообогрева вечномерзлых грунтов, совершенствование технологии и организации выполнения цементации зависит от точности определения в производственных условиях льдистости разных её видов: льдистость за счёт порового льда, за счёт льда – цемента, за счёт ледяных включений, теплоёмкости и других теплофизических величин.

В четвёртой главе излагается особенность предварительной оттайки вечномерзлых грунтов и выполнение цементационных работ на строительстве Колымской ГЭС.

При организации цементационных работ необходимо было учитывать не только геологические особенности строения створа гидроузла, но и компоновочные решения сооружений.

Правый берег характерен тем, что в его массиве расположено лишь одно сооружение – ВВС (временное водосбросное сооружение). Цементационная завеса примыкает здесь непосредственно к вечномерзлomu основанию.

Центральная часть цементационной завесы расположена на русловом талике. В этой части нет необходимости в электрооттайке грунта перед цементацией. Главное внимание необходимо было уделить организации цементационных работ. Цементация должна быть выполнена полностью или частично до поднятия уровня воды в водохранилище. Одной из проблем, которая решалась на центральном участке, была очередность организации цементационных работ под напором промежуточного бьефа водохранилища первой очереди.

На левобережном участке сосредоточены основные сооружения. На этом участке электрооттайка производилась с учётом размещения подземных подходных выработок, а также напорных и безнапорных сооружений. Учитывались и геологические особенности.

Для уточнения проектной технологии возведения завесы был организован научно-производственный участок на правом берегу р. Колымы. Размеры участка в плане 10x20м, глубина скважин 40м, шаг скважин гидрооттаивания 7x7м. Объём пород намеченный для оттаивания – 8000 м<sup>3</sup>.

Цементация производилась чистоцементным раствором с добавкой поваренной соли в количестве 6% от массы цемента.

Опытная цементация и гидрооттайка позволили сформулировать основополагающий принцип, что оттайка вечномерзлых пород водой из р.Колымы в летний период с температурой 10 – 16° позволяет качественно подготовить массив для цементации в течении 100 суток.

В пределах правобережного склона наблюдаются (как и предполагалось) сильнотрещиноватые породы с высокой льдистостью, раскрытие некоторых трещин достигало 150 ... 250мм.

Цементационные работы выполнялись из потерны на правом берегу (секции 1 ... 17). В основании секций 11 ... 17 растепление происходило за счёт фильтрации из водохранилища при повышении уровня до отн. 390м.

В секциях 8 ... 10 цементация производилась с предварительным оттаиванием основания.

Цементация выполнялась на правом берегу в две очереди. Первая очередь 40-метровый ряд, вторая очередь выполнялась при напоре 100м., на глубину до 60 м. Основной глубокий ряд выполнялся с шагом цементационных скважин 3м. Осложнения с цементацией отдельных зон возникали при водопоглощении более 0,5 ... 1 л/мин. В связи с этим осуществлялись технологические приёмы, позволяющие проводить цементацию трещин при больших скоростях воды. В частности, принимались увеличенные расходы цементного раствора в начальный момент нагнетания. Из-за отсутствия селюката натрия, в качестве инертных добавок применялись мелкие опилки. Удалось достичь плотности завесы на участке секций 8 ... 17 порядка 0,015 л/мин.

В русловой части в талике особенностью трещиноватости грунтов являются протяженные трещины с раскрытием до нескольких сантиметров. Опытными работами в русле установлена высокая водопроницаемость пород, достигающая десятков метров в сутки. С глубиной до 40 ... 50м водопроницаемость пород падает до десятых долей м/сут.

В проекте принято в русловой части осуществить по всему напорному фронту I очередь цементации до наполнения водохранилища с электрооттаиванием, где это было необходимо.

I очередь представляла собой однорядную цементацию на глубину 40м. Ниже выполнялась однорядная цементация до 60м. Цементация проводилась до конечного шага скважин 3м.

В итоге испытаний 120 интервалов, длиной около 5м каждый, в подавляющем большинстве удельное водопоглощение завесы не превышало 0,05 л/мин, что соответствует контрольному критерию.

Инженерно-геологические условия левобережного участка характеризуются протяженными тектоническими трещинами (до 10мм) заполненными льдом. Предлагалось цементационную завесу I очереди выполнить для перекрытия крупных трещин.

Цементация I очереди осуществлялась с электрооттайкой. Существенно влияние на оттайку скального массива оказала фильтрация из подземных выработок. Искусственный талик имел ширину около 20м и глубину 40м.

В верхней части, в зоне контакта с бетонными сооружениями, для улучшения контактной зоны цементация усилена двумя короткими рядами скважин.

Следует выделить противифльтрационную защиту бетона сооружений на левом берегу. В отдельных местах поглощение цемента достигало 500 – 1000кг/м, особенно в зонах межсекционных швов. Цементация на этих участках одновременно характеризует качество бетонных работ.

Контрольные скважины на участке порога водоприемника показали, что во всех зонах водопоглощение после выполнения цементации I и II очередей и дополнительных цементационных работ на бетонных сооружениях меньше контрольного критерия (0,03 л/мин.).

Заключение содержит основные итоги работы, а также перспективы дальнейшего развития данного научного направления.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Обобщение опыта проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в условиях Крайнего Севера является важной составной частью научной организации гидротехнического строительства на вечномерзлых грунтах.

2. Изменение фильтрационных, суффозионных, теплофизических характеристик вечномёрзлых оснований, распухенность и их консолидация при оттаивании, требуют особого, отличного от общепринятого подхода при создании противофильтрационных цементационных завес с применением предварительной оттайки грунтов основания.
3. Для выполнения противофильтрационных завес высоких плотин с оттайкой грунтов основания рекомендуется предусматривать цементационные потери и организацию термометрических наблюдений за основанием при его размораживании.
4. Применение цементации вечномёрзлых грунтов способствует выравниванию свойств основания, создает благоприятные условия для замораживания грунтов и улучшения напряженно-деформированного состояния сооружений.
5. Цементация скального основания может выполняться в природном состоянии без оттаивания при малой льдистости.  $\omega < 0,1$  (10%).
6. Оттаивание вечномёрзлых оснований целесообразнее всего проводить с применением электронагревателей омического типа.
7. Существующая методика расчета времени электрооттайки вечномёрзлого основания наиболее эффективна на ранних стадиях проектирования.
8. В производственных условиях, когда уточнены теплофизические характеристики основания и его объемная льдистость, время оттаивания следует определять с учетом неравномерности температурного поля в оттаиваемом массиве.
9. Предложенный в диссертации закон распределения температуры хорошо согласуется с натурными данными электрооттайки вечномёрзлого основания под водоприемник Колымской ГЭС.
10. Для организации оттаивания основания не целесообразно применять электронагреватели с удельной мощностью  $N > 1,0$  кВт м и диаметром стального обогревателя ( $D < 15$  мм). В таких условиях в омическом нагревателе развивается высокая температура, при которой возможно спекание породы и ухудшение ее теплофизических характеристик.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Фрумкин В.Н., Авдеев В.А, Когодовский О.А., Колеганов В.В., Лосев Е.Д., Кузнецов В.С., Матрошилина Т.В., Алтунин Ю.С., Кроник Я.А., Гаврилов А.Н. Натурные наблюдения за плотиной Колымской ГЭС в строительный период // Энергетическое строительство, 1986г., № 5 С. 39-40.
2. Фрумкин В.Н., Смолин Г.И., Ферингер А.Б. Усть-Среднеканская гидроэлектростанция // Гидротехническое строительство, 2001г., № 4 С.6-9.
3. Фрумкин В.Н., Федосеев В.И., Шишов И.Н. Опыт создания противофильтрационных устройств в скальных основаниях энергетических сооружений Крайнего Севера // Гидротехническое строительство, 2001г., № 8 С.26-32.
4. Фрумкин В.Н., Федосеев В.И., Шишов И.Н., Шерман М.М. Совершенствование способов создания цементационных завес в вечномёрзлых скальных основаниях гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство» 2001г., №8 С.33-40.
5. Словарь-справочник «Инженерное мерзлотоведение в гидротехнике» под ред. А.А. Кагана, Н.Ф.Кривоноговой. СПб.: Издательство ОАО «ВНИИГ им. Веденеева» 2001г.

254 с. Авторы: Фрумкин В.Н., Г.Ф. Биянов, А.А. Каган, Н.Ф. Кривоногова., Л.И. Кудояров., Г.И. Кузнецов., В.И. Макаров., В.А. Пехтин., А.А. Серов.

6. Фрумкин В.Н., Комаров Ю.С. Уточнение инженерно-геологических условий в процессе возведения сооружений Толмачевской ГЭС-3. В кн. Труды международной конференции «Геотехника. Оценка состояния оснований и сооружений».