### Гидротехническое строительство

Научная статья УДК 627.8.065; 627.8; 627.8.059.1 https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/81-93

А.Г. Трапезников, А.Т. Беккер, Е.С. Исаева, Н.Я. Цимбельман, Т.И. Чернова

ТРАПЕЗНИКОВ АНДРЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ – научный сотрудник, trapeznikov.ag@dvfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-9075-2799

БЕККЕР АЛЕКСАНДР ТЕВЬЕВИЧ – академик РААСН, д.т.н., профессор, bekker.at@dvfu.ru, https://orcid.org/0000-0002-2899-7995

ИСАЕВА ЕКАТЕРИНА СЕРГЕЕВНА – студентка направления «Строительство уникальных зданий и сооружений», профиль «Строительство гидротехнических сооружений повышенной ответственности», isaeva.es@students.dvfu.ru, https://orcid.org/0000-0003-0365-8505 Департамент морских арктических сооружений Политехнического института ЦИМБЕЛЬМАН НИКИТА ЯКОВЛЕВИЧ – к.т.н., доцент, директор департамента, tsimbelman.nya@dvfu.ru, https://orcid.org/0000-0002-6552-3000 ЧЕРНОВА ТАТЬЯНА ИГОРЕВНА – старший преподаватель, chernova.ti@dvfu.ru, https://orcid.org/0000-0003-0921-2184 Департамент геоинформационных технологий Политехнического института *Дальневосточный федеральный университет* 

Владивосток, Россия

# Численное моделирование температурного режима грунтовой плотины мерзлого типа Анадырского гидроузла

Аннотация: Строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений в условиях вечной мерзлоты является сложной инженерной задачей, с которой в нашей стране столкнулись в период освоения северных территорий в начале XX в. Одной их основных проблем при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов является их сезонное и техногенное оттаивание. По данным многолетних наблюдений за климатом многократно были отмечены тенденции изменения климата с повышением среднегодовых температур, особенно ярко это выражено в северных регионах. Эксплуатация плотин в условиях вечной мерзлоты осложняется значительным воздействием водохранилища на плотину и её температурное состояние. В таких условиях для анализа текущего состояния и прогнозирования поведения сооружения в будущем могут быть использованы современные методы компьютерного моделирования, учитывающие процессы тепломассопереноса, фазового перехода, фильтрации, а также работу охлаждающих установок и наличие снегового покрова. В данной статье на основе численного моделирования на ЭВМ представлены исследования температурного режима и напряженно-деформированного состояния грунтовой плотины мерзлого типа Анадырского гидроузла, которая непрерывно эксплуатируется с 1986 г. Исходные данные для моделирования сооружения приняты по натурным наблюдениям, проведенным в 2018–2019 гг. Ключевые слова: моделирование, многолетняя мерзлота, грунтовая плотина, сезонно-действующее охлаждающее устройство

Для цитирования: Трапезников А.Г., Беккер А.Т., Исаева Е.С., Цимбельман Н.Я., Чернова Т.И. Численное моделирование температурного режима грунтовой плотины мерзлого типа Анадырского гидроузла // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 1(50). С. 81–93. https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/81-93

### Введение

На территории Арктической зоны находится более 20 гидротехнических сооружений водохозяйственного и энергетического назначения [11]. В условиях сурового климата и вечной

<sup>©</sup> Трапезников А.Г., Беккер А.Т., Исаева Е.С., Цимбельман Н.Я., Чернова Т.И., 2022

Статья: поступила: 23.12.2021; рецензия: 01.02.2022; финансирование: Дальневосточный федеральный университет.

мерзлоты грунтовые плотины могут эксплуатироваться в различных температурных режимах. При проектировании плотин «талого» типа допускается их оттаивание в процессе эксплуатации. Для плотин «мерзлого» типа восприятие напора верхнего бьефа должно происходить в условиях промороженной центральной части тела плотины. Наличие в плотине фильтрационного потока не допускается.

Одним из основных критериев безопасной эксплуатации подобных сооружений является сохранение необходимого температурного режима. Особенно это важно для «мерзлых» плотин, где за основу взяты водонепроницаемость и высокие прочностные свойства замёрзших грунтов, с заполненными льдом порами.

Для охлаждения и поддержания грунтов в мерзлом состоянии могут быть использованы специализированные замораживающие устройства разного принципа действия, работающие на принудительной или естественной тяге хладагента. По агрегатному состоянию охлаждающего вещества они классифицируются на воздушные, жидкостные и парожидкостные. В качестве хладагента в жидкостных замораживающих системах обычно используют керосин, антифриз, этиленгликоль, в парожидкостных – фреон, пропан, аммиак.

Рассматриваемая грунтовая плотина мерзлого типа Анадырского гидроузла имеет длину по гребню 1330 м, максимальная высота плотины составляет 16 м, ширина по гребню – 8 м, максимальная ширина по основанию – 105 м [3] (рис. 1). Для поддержания температурного режима на плотине установлено 605 парожидкостных замораживающих устройств (ПЗУ) с шагом от 4,5 до 0,8 м (рис. 2).



Рис. 1. Общий вид грунтовой плотины Анадырского гидроузла (2017 г.)



Рис. 2. Парожидкостные охлаждающие устройства плотины Анадырского гидроузла

Создание численных моделей подобных сооружений в специальных расчетных комплексах показало себя как эффективный метод прогнозирования их температурного состояния. Научно-исследовательские работы по моделированию температурного режима грунтовых плотин проводились ведущими научно-исследовательскими организациями. В их числе ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева – исследование особенностей температурного состояния каменноземляной плотины Вилюйской ГЭС с использованием программы «SURFER-7» для обработки натурных наблюдений [8]. Нижегородским государственным архитектурно-строительным университетом в программном комплексе NORD.3D разработана трехмерная физико-математическая модель температурно-криогенного режима земляной плотины Карбасовской ГЭС на р. Омолон и грунтовой плотины Усть-Среднеканской ГЭС на р. Колыма [2]. Силами НИИ ВОДГЕО проводились исследования температурно-фильтрационного режима грунтовых плотин, возводимых в суровых климатических условиях с выполнением фильтрационных и температурных расчетов в программе «FILTR» для плотин Курейской и Колымской ГЭС [1]. На стадии проектирования мерзлой плотины Анадырского гидроузла были выполнены прогнозные теплотехнические расчеты изменения температурного состояния сооружения, грунтов основания и ложи водохранилища на 5 лет вперед (с 1986 по 1991 г.). В процессе эксплуатации сооружения температурный режим контролировался путем выполнения периодических натурных измерений при помощи сети термометрических скважин. Геофизические исследования на плотине в период ее возведения (1977–1984 г.) выполнялись Ленгидропроектом и в период эксплуатации (1993, 1995 гг.) – сотрудниками ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Дополнительно для контроля состояния мерзлотной завесы в 2008 г. использовались методы электроразведки (вертикального электрического зондирования и естественного электрического поля), выполненные сотрудниками лаборатории инженерной геологии и геокриологии ВНИИГ.

Внедрение современной и информативной системы мониторинга для плотины мерзлого типа формирует задачу построения системы контроля, которая позволит не только оперативно контролировать температурный режим сооружения, но и оценивать его напряжённодеформированное состояние, а также составлять прогноз поведения сооружения на ближайший эксплуатационный период до 5 лет [10]. Решение этой задачи возможно при использовании современных методов численного моделирования с учётом изменения климатических параметров системы, начального температурного состояния сооружения, влияния отепляющих факторов, работы замораживающих устройств, поэтапности возведения и эксплуатации сооружения.

Данный метод даёт возможность оценить состояние сплошности мерзлотной завесы в теле сооружения, отследить зоны, подвергающиеся оттаиванию в тёплый период года, сравнить результаты с данными термометрических наблюдений, проводимых на сооружении, определить границы талых и мёрзлых зон для последующего расчёта напряжённо-деформированного состояния.

## Описание процесса моделирования и постановка граничных условий модели

Моделирование рассматриваемого сооружения было выполнено на базе расчетного комплекса Plaxis с использованием модуля Plaxis Flow.

Расчетный комплекс PLAXIS 2D представляет собой конечно-элементный программный комплекс, предназначенный для двухмерных расчётов деформаций и устойчивости строительных объектов. Дополнительный модуль 2D Thermal в геотехнических проектах необходим для учёта влияния теплового потока на гидравлическое и механическое поведение грунтов и конструкций [5]. PLAXIS даёт возможность рассматривать процессы изменения свойств грунтов в результате изменения температуры, позволяя прогнозировать возможные проблемы устойчивости сооружений [6]. Исходные данные для задания граничных условий моделирования (рис. 3) получены по результатам натурных наблюдений на исследуемом сооружении, выполненных с участием авторов.



Рис. 3. Граничные условия модели

Создание конечно-элементной модели в ПК PLAXIS 2D выполнено на основе 15 узловых треугольных конечных элементов. Каждый треугольный элемент помимо 3 узлов по вершинам содержит по 3 дополнительных узла на каждой стороне элемента и 3 внутренних узла. Расчетная сетка насчитывает 1342 элементов и 10905 узлов (рис. 4).



Для выполнения моделирования все инженерно-геологические элементы сооружения и основания задаются отдельными грунтами (soils) со своими физико-механическими и теплофизическим характеристиками. Для плотины Анадырской ТЭЦ эти данные взяты по результатам выполненных ранее инженерно-геологических изысканий. ПЗУ на плотине заданы граничными температурными условиями в виде оттока теплового потока (behavior-outflow) с равномерным распределением по глубине (distribution-uniform), определенным по натурным измерениям.

Расчётные физико-механические характеристики грунтов (табл. 1) заданы по результатам инженерно-геологических изысканий, выполненных при проектировании гидроузла и по материалам пояснительной записки к критериям безопасности Анадырской ТЭЦ (2007 г.) [9].

Таблица 1

ели "М	н	Плотность	Модуль	Угол внутрен-	Удельное	Коэффициент теплопровод-	Объёмная теплоёмкость грунта, ккал/ (м <sup>3</sup> * град)	
	наименование грунта	грунта, р, т/м <sup>3</sup>	оощеи де- формации, Е, МПа	него трения, ф, град	сцепле- ние, с, МПа	ности грунта, ккал/ (м*ч* град)		
2	Дресвяно-щебени- стый грунт с суглинком до 40%	2,00	80,0	18	0,040	1,35	560	
3	Супесь тяжёлая заторфованная	1,40	20,0	14	0,15	2,0	550	
5	Песок пылеватый	1,69	50,0	19	0,05	2,4	520	
9	Гравийный грунт с суглинистым и супесчаным заполнителем	1,95	65,0	27	0,03	2,0	530	
11	Суглинок и глина засоленные	1,80	50,0	18	0,06	1,3	480	

Расчётные значения физико-механических характеристик грунтов

Моделирование и оценка поведения сооружения выполнялись по фазам продолжительностью в один месяц. Для каждой фазы рассчитывались среднемесячные значения температур для задания граничных условий. Принятые значения граничных условий представлены на рисунках 5–7 и в таблицах 2–3.

Температура поверхности на границе «грунт-воздух» рассматриваемого сооружения зависит от воздействия следующих внешних факторов: температуры окружающего воздуха, ветровых условий, солнечной инсоляции, снеговых условий [7]. Зависимость температуры на поверхности грунта от температуры воздуха может быть выведена на основе анализа ряда натурных наблюдений [4] (рис. 5, табл. 2). Такая зависимость будет уникальна для каждого сооружения.



Рис. 5. График изменения температуры на поверхности «грунт-воздух»

Таблица 2

Температура на поверхности «грунт-воздух» в зависимости от температуры воздуха

Температура, °С	янв.	февр.	март	апр.	май	июнь	июль	авг.	сент.	окт.	нояб.	дек.
Воздух	-22,6	-22	-19,3	-12,8	-1,6	+6,3	+11,6	+10,1	+4,6	-4,6	-13,3	-19,3
Поверхность грунта	-14,7	-14,3	-12,5	-8,3	-1	+6,3	+11,6	+10,1	+4,6	-3,0	-8,6	-12,5

Уровень и температура воды в водохранилище приняты в соответствии с данными инструментальных измерений, проводимых персоналом Анадырской ТЭЦ. По итогам многолетних наблюдений установлено, что водохранилище Анадырского гидроузла в холодный период года покрывается льдом толщиной более 1 м. Граничные температурные условия поверхности дна водохранилища разделены на две группы (в основной части водохранилища и в береговой зоне) и приняты равными среднему значению температуры воды в этих областях в конкретные месяцы (рис. 6, табл. 3).





#### ВЕСТНИК ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ ДВФУ. 2022. № 1(50)

Таблица 3

Температура, °С	янв.	февр.	март	апр.	май	июнь	июль	авг.	сент.	окт.	ноя.	дек.
Воздух	-22,6	-22	-19,3	-12,8	-1,6	+6,3	+11,6	+10,1	+4,6	-4,6	-13,3	-19,3
Дно в береговой зоне	-10	-12	-10	-6	0	+5	+14	+16	+9	+3	-5	-8
Дно в глубоководной зоне	+2	+2	+2	+2	+2	+4	+5	+6	+6,5	+4	+3	+2

Температура на поверхности дна в водохранилище

Уровень воды в водохранилище в течение года близок к нормальному подпорному уровню +13,7 м. Максимальный уровень воды в июне во время паводка принят 14,5 м. Сработка воды в водохранилище до начала паводка принята до уровня 13,5 м (рис. 7, табл. 4).



Рис. 7. График изменения уровня водохранилища

Режим работы ПЗУ принят исходя из условий работы при температурах воздуха ниже, чем температуры тела плотины. Принцип действия замораживающих устройств на плотине Анадырского гидроузла основан на работе пассивных термосифонов, используемых без внешних затрат энергии. В процессе передачи тепла хладагент естественным образом конденсируется и испаряется, циркулируя внутри ПЗУ. Интенсивность работы этих установок зависит от разности температур охлаждаемого грунта и наружного воздуха.

При численном моделировании принято, что охлаждение начинается при устойчивой температуре наружного воздуха – равна или ниже -10 °C. Плотность теплового потока [Bt/m<sup>2</sup>] ПЗУ определяется индивидуально и зависит от площади надземной части установки, скорости ветра и температуры окружающего воздуха. Принятая среднемесячная многолетняя интенсивность теплового потока для ПЗУ, установленных с шагом 4 м: декабрь, январь, февраль, март – 2,4 Вт/м<sup>2</sup>; апрель, ноябрь – 1,92 Вт/м<sup>2</sup>; май – 0,96 Вт/м<sup>2</sup>; июнь – 0,24 Вт/м<sup>2</sup>; июль, август, сентябрь – 0 Вт/м<sup>2</sup>; октябрь – 0,72 Вт/м<sup>2</sup>.

Начальная температура гуртового массива принималась равной -5 °C. Для достижения температур модели, соответствующих натурным данным, начальные граничные условия задавались на основе средних многолетних значений. Начальные фазы делились условно на «теплую» (122 дня) и «холодную» (243 дня) с положительными и отрицательными значениями средних многолетних температур воздуха. Далее калибровка температур грунта выполнялась по фазам длиной в один месяц, где также использовались средние многолетние значения для задания граничных условий. Далее, через 3-5 лет, модель выходила на заданные значения и результаты аналогичных месяцев соседних лет не изменялись. По этим результатам выполнялась по достижении достаточной сходимости модель может быть использована для дальнейших расчетов, таких как прогнозирование и моделирование аварийных случаев на сооружении.

В температурной задаче граничные условия по боковым границам модели приняты закрытыми (тепловой поток равен нулю). Нижняя граница задана постоянной температурой вечной мерзлоты –5 °С. По результатам расчета температурного состояния плотины определяется стадия её максимального оттаивания и формируется модель для оценки напряженно-деформированного состояния с учетом распределения талых и мерзлых зон. В качестве оценки напряженно-деформированного состояния сооружения выполнялся расчет устойчивости плотины по первой группе предельных состояний для основного сочетания нагрузок. Нагрузки и воздействия назначались с учётом класса сооружения и принятых в проекте условий эксплуатации. Перемещения по нижней и боковым граням модели при расчете напряженно-деформированного состояния принимались равными нулю.

#### Анализ результатов

Данные о температурном состоянии плотины Анадырского гидроузла, полученные по результатам моделирования, дают возможность оценить температурный режим сооружения в местах, где отсутствует термометрическое оборудование, определить поведение сооружения при изменениях в условиях его эксплуатации (выход ПЗУ из строя, аномальные значения температур воздуха). В ходе моделирования сооружения на пикете 3+50 в мае и сентябре получены зоны распределения температур (рисунки 8, 9).







Рис. 9. Визуализация результатов теплового расчета на ПК 3+50 в сентябре

Наибольшее расхождение результатов моделирования и данных натурных измерений наблюдается в мае на момент максимального промораживания (рисунки 10, 11). На пикете 5+50 среднее отклонение составило 2,11 °C по показаниям термоскважины № 18. При корректировке интенсивности работы замораживающих устройств в модели характер распределения температур в теле сооружения стал ближе к натурным данным, но все же имел достаточную разницу – до 2 °C. Мощность оттока тепла при этом была задана 2,4 Вт/м<sup>2</sup> на погонный метр расчетной модели.

ВЕСТНИК ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ ДВФУ. 2022. № 1(50)



Рис. 10. Сравнение результатов компьютерного моделирования и натурных наблюдений на пикете 3+50 в мае (слева) и октябре (справа). Пунктирная линяя: синяя – первый этап моделирования, красная – второй этап моделирования с уточненными граничными условиями, зеленая – натурные наблюдения (скважина № 2–2)



Рис. 11. Сравнение результатов компьютерного моделирования и натурных наблюдений на пикете 5+50 в мае (слева) и октябре (справа). Пунктирная линяя: синяя – первый этап моделирования, красная – второй этап моделирования с уточненными граничными условиями, зеленая – натурные наблюдения (скважина № 18)

В ходе моделирования грунтовой плотины Анадырского гидроузла были проанализированы и выделены факторы, влияющие на температурное состояние грунтовых плотин мерзлого типа с установками по охлаждению грунтов. Преобладающее влияние на температурное состояние подобных сооружений оказывают окружающий температурный режим и работоспособность ПЗУ. В свою очередь эти факторы влияют на распределение температур в теле сооружения и водохранилище.

При анализе данных натурных наблюдений за плотиной мерзлого типа Анадырской ТЭЦ можно выделить зоны с постоянным и переменным температурными режимами. Переход между этими зонами отмечается на глубине 7 м (рис. 12).



Рис. 12. Среднемесячные температуры грунта по месяцам

Максимальные отклонения результатов расчетов с инструментальными измерениями приходятся на период максимального промораживания в мае, что вызвано погрешностью в задании граничных условий в этот период из-за недостаточного количества данных натурных наблюдений. В теплый период модель имеет высокую сходимость с натурными данными, расхождения составляют менее 1 °C.

#### Определение напряженно-деформированного состояния

В качестве первого расчётного случая рассмотрено сечение по телу плотины в месте (поперечник ПК 7+50), где плотина имеет наибольшую высоту (H=16 м). В результате расчёта выполнен поиск наиболее опасной поверхности обрушения и определены коэффициенты устойчивости для верхового и низового откосов плотины (рисунки 13, 14).







ВЕСТНИК ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ ДВФУ. 2022. № 1(50)

Рис. 14. Цветовая индикация (а) и контуры возможных поверхностей обрушения (б для верхового откоса плотины (для наиболее опасной поверхности сдвига коэффициент устойчивости ks=2,5)

Поиск возможных поверхностей обрушения для верхового и низового откосов выполнен автоматизировано в ПК Plaxis 2D. Программа позволяет рассчитать коэффициент безопасности, проследить потенциальные поверхности скольжения и судить о возможном механизме разрушения.

Для первого расчётного случая получены (для наиболее опасной поверхности сдвига) коэффициенты устойчивости: для низового откоса ks=2,8 (см. рис. 13).

Полученные коэффициенты устойчивости для низового и верхового откосов – ks>1,15, то есть устойчивость откосов для первого расчётного случая обеспечена и соблюдается требование п. 9.11 СП 39.13330.2012.

#### Заключение

В настоящей работе поставлена задача формирования численной модели плотины мерзлого типа, которая позволит оперативно контролировать состояние температурного режима сооружения, оценивать его напряжённо-деформированное состояние, а также составлять прогноз поведения сооружения на ближайший эксплуатационный период. В ходе создания модели были учтены следующие факторы: текущая температура сооружения, температура окружающей среды, наличие ветра и снега, уровень и температура воды в водохранилище, работа охлаждающих устройств, переменные теплофизические характеристики материалов, учёт процессов тепломассопереноса, фазовый переход талых и мерзлых материалов, возможное наличие фильтрации, поэтапность возведения и эксплуатации сооружения. Многие из этих характеристик зависят друг от друга и изменяются во времени.

Подобный метод даёт возможность оценить состояние сплошности мерзлотной завесы в теле сооружения; отследить зоны, подвергающиеся оттаиванию в тёплый период года; сравнить результаты с данными термометрических наблюдений, проводимых на сооружении; определить границы талых и мёрзлых зон для последующего расчёта напряжённо-деформированного состояния. Предложенная модель грунтовой плотины мерзлого типа показала высокую точность результатов в период максимального оттаивания сооружения, но в то же время в мае погрешность значений температуры может достигать нескольких градусов. Для использования модели в качестве расчетного обоснования и выполнения прогнозных расчетов поведения сооружения необходимо завершить валидацию модели, а также проверить её в трехмерной постановке. Для дальнейшего развития модели необходимо учесть влияние снега на поверхности сооружения, обратить внимание на глубинное распределение температур в водохранилище, уточнить работу охлаждающих устройств в холодный период года.

Вклад авторов в статью: А.Г. Трапезников – сбор и обработка натурных данных, валидация модели; анализ результатов; А.Т. Беккер – постановка температурной задачи и программы исследований; И.С. Исаева – обработка и анализ результатов моделирования; Н.Я. Цимбельман – анализ результатов исследований; Т.И. Чернова – создание конечно-элементной модели, формулировка граничных условий модели, выполнение расчетов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 1. Антонов А. С. Температурно-фильтрационный режим грунтовых плотин, возводимых в суровых климатических условиях. 2016. URL: http://lib.hydropower.ru/books/doc\_00043227.pdf
- 2. Горохов Е. Н., Февралев А.В. Расчет теплофильтрационного режима сопряжения земляных и бетонных сооружений типа «ГЭС-земляная плотина» или «водосброс-земляная плотина» // Энергетическое строительство. 1984. № 11. С. 45–47.
- 3. Демченко Т.В., Кривоногова К.Ф., Суздаль Д.И., Кликунов В.И. Гидроузлы Чукотки: инженерно-геокриологические условия. Магадан: ЧФ СВКНИИ ДВО РАН, 2005. 112 с.
- 4. Климатические таблицы. Данные для Анадыря // Погода и климат: справочно-информационный портал. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/climate/25563.htm (дата обращения: 21.12.2021).
- 5. Моделирование промерзания грунта вокруг одиночного термосифона в PLAXIS. URL: https://www.notion.so/PLAXIS-119ef33195164743a43953099dd7edac (дата обращения: 21.12.2021).
- 6. Назначение теплофизических параметров грунтов для температурных расчётов в PLAXIS. URL: https://www.notion.so/PLAXIS-d3620d35108443bda23b3334cc7eacf5 (дата обращения: 21.12.2021).
- 7. Панов С.И., Буряков О.А., Прямицкий А.В., Бычков Е.В. Анализ влияния граничных и начальных условий на результаты расчетов температурного состояния грунтовых плотин на севере // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2012. Т. 266. С. 44–54. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18262794 (дата обращения: 21.12.2021).
- Панов С.И., Николаев Ю.М. Особенности температурного состояния каменно-земляной плотины Вилюйской ГЭС после 40 лет эксплуатации // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2008.
  Т. 252. С. 3–13. URL: http://www.vniig.rushydro.ru/company/publications/collection/34569.html (дата обращения: 04.02.2022).
- 9. Пояснительная записка к критериям безопасности гидротехнических сооружений Анадырской ТЭЦ. ОП ОАО «Чукотэнерго», Анадырская ТЭЦ, 2007.
- Рекомендации по расчетам температурного режима плотин из грунтовых материалов, возводимых в северной строительно-климатической зоне. Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева, 1985. 67 с.
- 11. Чжан Р.В. Гидроузлы в Арктической зоне России // Криосфера Земли. 2016. Т. ХХ, № 4. С. 79–92.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 1/50 *Hydraulic engineering* 

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/81-93

Trapeznikov A., Becker A., Isaeva E., Tsimbelman N., Chernova T.

ANDREY G. TRAPEZNIKOV, Researcher, trapeznikov.ag@dvfu.ru, https://orcid.org/0000-0001-9075-2799 ALEXANDER T. BECKER, Academician of RAACS, Doctor of Engineering Sciences, Professor, bekker.at@dvfu.ru, https://orcid.org/0000-0002-2899-7995 EKATERINA S. ISAEVA, Student, isaeva.es@students.dvfu.ru, https://orcid.org/0000-0003-0365 -8505 Department of Marine Arctic Structures NIKITA Ya. TSIMBELMAN, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Director of Department, tsimbelman.nya@dvfu.ru, https://orcid.org/0000-0002-6552-3000 TATYANA I. CHERNOVA, Senior Lecturer, chernova.ti@dvfu.ru, https://orcid.org/0000-0003-0921-2184 Department of Geoinformation Technologies Polytechnic Institute *Far Eastern Federal University* Vladivostok, Russia

# Numerical modeling of the thermal regime of the frozen-type embankment dam of the Anadyr hydrosystem

**Abstract**: Construction and operation of hydraulic structures in permafrost conditions is a complex engineering task, our country faced during the northern territories' development at the beginning of the 20th century. One of the main problems of the engineering structures' construction and operation in the areas of permafrost soils is their seasonal and technogenic thawing. According to the data of long-term climate observations, tendencies of climate change with an increase in average annual temperatures have been repeatedly noted, especially in the northern regions. The operation of dams in permafrost conditions is complicated by the reservoir's significant impact on the construction of the dam and its thermal regime. Under such conditions, upto-date simulation methods, that consider the processes of heat and mass transfer, phase transition, filtration, operation of cooling units and the presence of snow cover, can be used to analyze the current state and predict the behavior of a structure in future. Based on numerical simulation on a computer the present article describes the thermal regime and the stress-strain state of the frozen-type embankment dam of the Anadyr hydrosystem, which has been continuously operated since 1986. The initial data for modeling the structure were taken from field observations conducted in 2018–2019.

Keywords: modeling, permafrost, embankment dam, seasonal cooling unit

**For citation**: Trapeznikov A., Becker A., Isaeva E., Tsimbelman N., Chernova T. Numerical modeling of the thermal regime of the frozen-type embankment dam of the Anadyr hydrosystem. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2022;(50):81-93. (In Russ.). https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-1/81-93

Contribution of the authors: A.G. Trapeznikov – accumulation and interpretation of field data, model validation; analysis of results; A.T. Bekker – formulation of the temperature problem and research program; I.S. Isaeva – processing and analysis of simulation results; N.Ya. Tsimbelman – analysis of research results; T.I. Chernova – creating a finite element model, formulating the model's boundary conditions, calculating. The authors declare no conflict of interests.

#### REFERNCES

1. Antonov A. S. Temperature and filtration regime of soil dams erected in harsh climatic conditions. 2016. URL: http://lib.hydropower.ru/books/doc\_00043227.pdf

- 2. Gorokhov E. N., Fevralev A. V. Calculation of the heat-filtration regime of the interface of earthen and concrete structures of the type "HPP-earth dam" or "spillway-earth dam". Energeticheskoe stroitel'stvo. 1984;(11):45-47.
- 3. Demchenko T.V., Krivonogova K.F., Suzdal D.I., Klikunov V.I. Hydroelectric facilities of Chukotka: engineering and geocryological conditions. Magadan, ChF SVKNII FEB RAN, 2005. 112 p.
- 4. Climate tables. Data for Anadyr. Weather and climate: reference and information portal. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/climate/25563.htm 12.21.2021.
- 5. Simulation of soil freezing around a single thermosiphon in PLAXIS. URL: https://www.no-tion.so/PLAXIS-119ef33195164743a43953099dd7edac 12.21.2021.
- 6. Assignment of thermophysical parameters of soils for temperature calculations in PLAXIS. URL: https://www.notion.so/PLAXIS-d3620d35108443bda23b3334cc7eacf5 12.21.2021.
- 7. Panov S.I., Buryakov O.A., Pryamitsky A.V., Bychkov E.V. Analysis of the influence of boundary and initial conditions on the results of calculations of the temperature state of soil dams in the north. Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva. 2012;266:44-54.
- 8. Panov S.I., Nikolaev Yu.M. Features of the temperature state of the rock-and-earth dam of the Vilyui hydroelectric power station after 40 years of operation. Proceeding of the VNIIG. 2008;252:3-13. URL: http://www.vniig.rushydro.ru/en/institute/publications/proceeding/34570.html 04.02.2022.
- 9. Explanatory note to the safety criteria for hydraulic structures of the Anadyr CHPP. OP JSC "Chukotenergo", Anadyr CHPP, 2007.
- 10. Recommendations for temperature regime calculation for soil dams in the northern areas. Vedeneev VNIIG, 1985. 67 p.
- 11. Zhang R.V. Hydrosystems in the Arctic zone of Russia. Cryosphere of the Earth. 2016;20(4): 79-92.