# Спасенникова Клавдия Анатольевна

Компьютерное моделирование тепломассопереноса в грунтах под сооружениями, построенными на вечной мерзлоте с использованием сезонных охлаждающих устройств

Специальность: 25.00.08 – инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте криосферы Земли Сибирского отделения РАН

Научный руководитель: Аникин Геннадий Владимирович

кандидат физико-математических наук,

ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: Мусакаев Наиль Габсалямович

доктор физико-математических наук, доцент, руководитель лаборатории гидродинамики многофазных сред

ТюмФ ИТПМ СО РАН

Губарьков Анатолий Анатольевич

кандидат технических наук,

Тюменский государственный нефтегазовый

университет, научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Тюменский государственный

университет

Защита состоится 10 апреля 2015 г. в  $14^{00}$  на заседании диссертационного совета ДМ 003.042.02 при Институте криосферы Земли СО РАН по адресу: 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института криосферы Земли СО РАН по адресу: г. Тюмень, ул. Таймырская, 74.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» февраля 2015 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 625000, Тюмень, а/я 1230,

e-mail: sciensec@ikz.ru

Ученый секретарь диссертационного совета ДМ 003.042.02, кандидат географических наук

Якимов А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Освоение природных ресурсов Арктики сопровождается масштабным приполярных регионов строительством условиях вечномерзлых грунтов. Для укрепления оснований зданий вечной сооружений, построенных на мерзлоте, используется метод замораживания грунтов под этими основаниями. Замораживание грунтов производится либо с помощью холодильных машин, либо с помощью сезонных охлаждающих устройств (СОУ), не требующих затрат электрической энергии. Использование СОУ не только позволяет экономить электрическую энергию, но и производить охлаждение грунтов в районах, где электричество не доступно, например, на нефтепроводах и газопроводах. При этом для замораживания больших площадей используются горизонтальные естественнодействующие трубчатые системы (ГЕТ), разработанные в ООО НПО «Фундаментстройаркос». Прогнозированию работы именно этих систем и посвящена данная диссертация.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является проведение теоретических исследований процессов теплообмена в сложной инженерной системе «грунт – ГЕТ – сооружение, построенное на вечной мерзлоте», которые учитывали бы стохастичность таких параметров задачи, как скорость ветра, температура воздуха и толщина снежного покрова.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- 1. Создана программа «Stohastic 3D», позволяющая моделировать работу СОУ под зданиями и сооружениями.
- 2. Решена задача Стефана с учетом случайных изменений метеорологических характеристик.
- 3. Стохастическими методами с использованием метеорологических данных и технических параметров СОУ вычислена вероятность нахождения грунта в талом состоянии в произвольной точке расчетной области.

4. Рассчитаны температурные поля под пожарным депо на Ванкорском месторождении, под нефтяным резервуаром на Уренгойском месторождении и под резервуаром с нефтью на Варандейском месторождении.

#### Научная новизна.

- 1. Создана методика расчета, позволяющая рассчитать теплообмен между системой ГЕТ и грунтом, а также теплообмен между грунтом, атмосферой и сооружением, построенном на вечной мерзлоте.
- 2. Предложен метод стохастического прогнозирования состояния грунтов, органично сочетающий в себе детерминистский подход математической физики с методами математической статистики. Однако, в отличие от стандартной статистики объектами изучения в данном случае являются не случайные величины, а трехмерные температурные поля. Важно, что они к условиям решения Стефана. удовлетворяют задачи стохастического прогнозирования позволяет получить одновременно большое количество 3D температурных полей, с учетом всех возможных вариантов изменения во времени скорости ветра, температуры воздуха и толщины снежного покрова. Полученная совокупность 3D температурных полей, позволяет вычислить в каждой точке пространства вероятность нахождения талом мерзлом состоянии оценить эффективность грунта ИЛИ И проектируемой системы ГЕТ.

Достоверность. В диссертационной работе проведено сравнение теоретических данных с показаниями термометрических конкретных объектах. Среднеквадратичное отклонение теоретических данных от экспериментальных в большинстве случаев меньше 1.5°C и, как правило, по точностью порядку величины совпадают c измерения температуры в термометрических скважинах, что говорит 0 хорошей достоверности полученных результатов.

**Практическая ценность.** Разработанный метод расчета позволяет с достаточной точностью прогнозировать динамику изменения температурных

полей в грунтах с применением систем ГЕТ и может быть использован при проектировании объектов, охлаждаемых СОУ. Данный метод был использован при расчете конкретных объектов совместно с ООО НПО «Фундаменстройаркос».

#### Защищаемые положения:

- Разработана методика расчета, позволяющая рассчитать теплообмен между системой ГЕТ и грунтом, а также теплообмен между грунтом, атмосферой и сооружением, построенном на вечной мерзлоте.
- Предложен метод стохастического прогнозирования состояния грунтов под объектами, охлаждаемыми СОУ.

**Апробация работы.** Результаты, приведённые в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- X международная конференция по мерзлотоведению TICOP «Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире», Салехард, 2012;
- Международная научно-практическая конференция по инженерному мерзлотоведению, посвященная XX-летию ООО НПО «Фундаментстройаркос», Тюмень, 2011;
- Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов, посвященная XX-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос» «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего севера», Тюмень, 2011.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 14 работах, в том числе 10 статей в изданиях из перечня российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук.

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 154

страницах, включает 108 рисунков и 40 таблиц. Список литературы содержит 108 наименований.

Личный вклад соискателя. Все результаты, вошедшие в диссертацию, получены при личном участии автора в теоретических исследованиях. Постановка задач, определение методов решения и анализ результатов исследований выполнены соискателем лично совместно научным руководителем. При непосредственном участии автора была создана работу СОУ под зданиями программа, позволяющая моделировать сооружениями.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю Аникину Геннадию Владимировичу за понимание, терпение и поддержку, за неоценимое участие в планировании и проведении научных исследований, помощь в написании публикаций по теме работы.

Выражаю благодарность Горелику Я.Б. за плодотворное обсуждение, полезные советы и ценные замечания по исследуемой теме на научных семинарах.

Благодарю всех своих соавторов по совместным публикациям.

Особую признательность автор выражает академику Мельникову В.П. и д.х.н. профессору Нестерову А.Н. за внимание к исследуемой теме, доброе отношение, неоценимую поддержку в ходе выполнения диссертационной работы.

# ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель, изложена научная новизна и практическая ценность работы, кратко изложена структура диссертации.

**В первой главе** приведен обзор литературы по данной тематике. Показан вклад в исследование вечной мерзлоты таких авторов как Мельников В.П., Хрусталев Л.Н., Горелик Я.Б., Вакулин А.А., Колунин В.С., Долгих Г.М.,

Окунев С.Н., Дубина М.М., Мусакаев Н.Г., Феклистов В.Н., Макаров В.И., Поденко Л.С. и многих других. Также рассмотрены работы связанные с решением нелинейной задачи Стефана и теплообменом в сезонных охлаждающих устройствах и охлаждаемых ими грунтах. Приводится методика расчета объектов, представленных в диссертации. Для расчета теплообмена в грунте применялся метод эффективной теплоемкости, в рамках которого уравнение теплопроводности записывается в виде:

$$\left[c + L\delta(t - t_f)\right] \frac{dt}{d\tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) \tag{1}$$

Где с — объемная теплоемкость грунта,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности грунта, t — температура,  $t_f$  — температура фазового перехода, x,y,z — декартовы координаты,  $\tau$  - время,  $\delta(t-t_f)$  — дельта функция Дирака.

L - латентная теплота фазового перехода единицы объема грунта, задается следующим выражением:

$$L = r \cdot (w - W_{HG}) \gamma_{CK} \tag{2}$$

Где r - удельная теплота плавления льда, w- влажность грунта,  $w_{{\scriptscriptstyle H}{\scriptscriptstyle B}}$  - влажность за счет незамерзшей воды,  $\gamma_{c\kappa}$  - плотность скелета грунта.

На рисунке 1 представлена схема граничных условий в расчетной области.

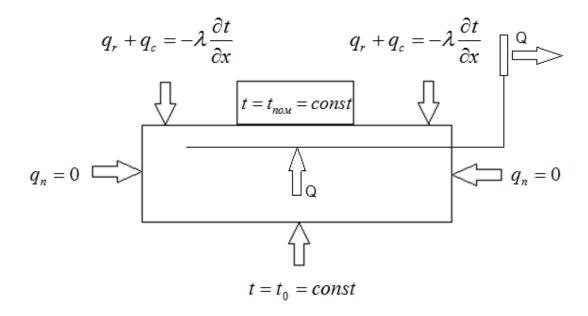


Рис.1. Схема граничных условий.

На боковых поверхностях расчетной области берется граничное условие  $q_n=0$ ,  $q_n$  - тепловой поток, перпендикулярный боковой поверхности расчетной области. На нижней границе расчетной области задается граничное условие первого рода  $t=t_0=const$ . Под зданием задается граничное условие  $t=t_{\text{пом}}=const$ . Здесь  $t_0$  - начальная температура,  $t_{\text{пом}}$  - температура в помещении.

Тепловое взаимодействие поверхности грунта с атмосферой главным образом зависит от теплового воздействия радиации и конвективного теплообмена. Тепловой поток, задающий воздействие радиации на поверхность грунта или снега задается следующим выражением:

$$q_r = R(1 - A) - \epsilon \sigma T_s^4 (1 - p) \tag{3}$$

Где  $q_r$  - радиационный тепловой поток, R - суммарная прямая и рассеянная солнечная радиация, A - альбедо,  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $T_s$  - температура поверхности Земли (К), p - доля инфракрасного излучения, излученного поверхностью и отраженного атмосферой назад к поверхности Земли,  $\epsilon$  - коэффициент серости поверхности (Павлов, 1984), коэффициент серости можно принимать близким к единице, а величина p в среднем по планете (Trenberth et al., 2009), равна 0,84. Данная величина в нашем конкретном случае неизвестна, однако вклад от нее в общий тепловой поток не является определяющим, поэтому для расчетов можно использовать среднее по планете значение.

Конвективный тепловой поток от атмосферы к грунту или снегу задается следующим выражением:

$$q_c = \frac{\varrho c_p(\alpha_0 \kappa)^2 v(z) \left( t(z) - t(0) \right)}{\left( ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \right)^2} \tag{4}$$

Здесь  $q_c$  - тепловой поток, обусловленный конвекцией,  $\varrho$  - плотность воздуха,  $c_p$  - удельная теплоемкость воздуха,  $\alpha_0=1.25, \kappa=0.4$  - постоянная Кармана,

v(z) - скорость ветра на высоте z от поверхности, t(z) - температура воздуха на высоте z, t(0) - температура воздуха вблизи поверхности снега или грунта.

Обычно температуру воздуха измеряют на высоте около двух метров, а скорость ветра на высоте 10м, для того чтобы получить окончательное выражение учтем, что выполняется следующее соотношение:

$$v(z) = v(10) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \tag{5}$$

Подставляя (5) в (4), получаем окончательное выражение для конвективного теплового потока (6)

$$q_c = \frac{\varrho c_p (\alpha_0 \kappa)^2 v(10) \left( t(z) - t(0) \right)}{\ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \ln \left( \frac{10}{z_0} \right)} \tag{6}$$

Где z - высота, на которой измеряется температура воздуха на метеостанции,  $z_0$  - параметр, который учитывает шероховатость подстилающей поверхности. Чем больше шероховатость подстилающей поверхности, тем больше  $z_0$ . Для гладкого покрытия, такого как снег (Foken, 2008),  $z_0 = 0.001$ м, A=0.75; для грунта  $z_0 = 0.02$ м, A=0.25.

Значение суммарной прямой и рассеянной солнечной радиации берутся из СНИП 131.13330.2012, граничные условия на поверхности грунта записываются следующим образом:

$$q_r + q_c = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \tag{7}$$

Здесь  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала, граничащего с воздухом, будь то снег или просто грунт, x - глубина.

Разностная схема, по которой рассчитывалось температурное поле в грунте следующая:

$$t(i,j,k,n+1) = t(i,j,k,n) +$$

$$+ \frac{a(i,j,k) \cdot h_{\tau} \cdot (t(i+1,j,k,n) + t(i-1,j,k,n) - 2t(i,j,k,n))}{h_{\chi}^{2}}$$

$$+ \frac{a(i,j,k) \cdot h_{\tau} \cdot (t(i,j+1,k,n) + t(i,j-1,k,n) - 2t(i,j,k,n))}{h_{\gamma}^{2}}$$

$$+ \frac{a(i,j,k) \cdot h_{\tau} \cdot (t(i,j,k+1,n) + t(i,j,k-1,n) - 2t(i,j,k,n))}{h_{\gamma}^{2}}$$

$$(8)$$

Сетка пространственных и временных координат в расчетной области, а также критерий устойчивости явной разностной схемы, задаются следующими выражениями

$$x_{i} = i \cdot h_{x} \qquad 0 \leq i \leq i_{max}$$

$$y_{j} = j \cdot h_{y} \qquad 0 \leq j \leq j_{max}$$

$$z_{k} = k \cdot h_{z} \qquad 0 \leq k \leq k_{max}$$

$$\tau_{n} = h_{\tau} \cdot n \qquad 0 \leq n \leq n_{max}$$

$$h_{\tau} \leq \frac{1}{3a} \left( \frac{1}{h_{x}^{2}} + \frac{1}{h_{y}^{2}} + \frac{1}{h_{z}^{2}} \right)^{-1}$$

t(i,j,k,n) - температура в узле с координатами  $x_i,y_j$  и  $z_k$  в момент времени  $\tau_n$ ,  $a=max(a_{\rm T},a_{\rm M}),\ a_{\rm T},a_{\rm M}$  - температуропроводности талого и мерзлого грунта соответственно,  $h_x,h_y,h_z$  - величины шагов по координатам х,у,z соответственно,  $h_{\tau}$  - шаг по времени,  $i_{max}$ ,  $j_{max}$ ,  $k_{max}$  - максимальные значения i,j,k, задающие размеры расчетной области,  $n_{max}$  - задает момент времени, в который определяется температурное поле.

a(i,j,k) - определяется следующими выражениями

$$a(i,j,k) = \begin{cases} a_{_{M}} & \text{при } t(i,j,k,n) < t_{f} - \Delta \\ \frac{0.5(\lambda_{_{M}} + \lambda_{_{m}})}{0.5(c_{_{M}} + c_{_{m}}) + \frac{L}{2\Delta}} & \text{при } t_{f} - \Delta \leq t(i,j,k,n) \leq t_{f} + \Delta \\ a_{_{m}} & \text{при } t(i,j,k,n) > t_{f} + \Delta \end{cases}$$

Данная разностная схема соответствует методу эффективной теплоемкости (Самарский, Вабищевич, 2003).

Здесь  $\lambda_{\rm T}$ ,  $\lambda_{\rm M}$  - коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта,  $c_{\rm T}$ ,  $c_{\rm M}$  - объемные теплоемкости талого и мерзлого грунта,  $\Delta$  - параметр, который в рамках метода эффективной теплоемкости определяет диапазон температур фазового перехода.

Сетка координат подбирается всегда таким образом, чтобы узлы решетки проходили через трубы испарителей охлаждающей системы (трубы испарителей охлаждающей системы считаются линейными источниками холода). Несложно вычислить, что тепловой поток, входящий в узел, через который проходит труба испарителей охлаждающей системы и имеющий по координатам х,у,z номера i,j,k, соответственно задается выражением (9)

$$U_{i,j,k} = \frac{\lambda_{\rm rp} h_{\chi} h_{z}}{h_{\nu}} \left( t_{i,j+1,k} + t_{i,j-1,k} - 2t_{\mu} \right) + \frac{\lambda_{\rm rp} h_{y} h_{z}}{h_{\chi}} \left( t_{i+1,j,k} + t - 2t_{\mu} \right)$$
(9)

Тепловой обмен между испарительной системой СОУ и атмосферой задается граничным условием (10)

$$Q = \sum_{i,j,k \in M} U_{i,j,k} = S_{\text{кон}} \cdot N_{\text{кон}} \cdot \eta_{\vartheta \phi} (t_{\kappa} - t_a) \cdot \alpha$$
(10)

Где Q - суммарный тепловой поток, входящий в испарительную систему и выходящий через систему конденсаторов, М - множество узлов вычислительной сетки, через которые проходят трубы охлаждающей системы,  $S_{\text{кон}}$  - площадь одного конденсатора,  $N_{\text{кон}}$  - количество конденсаторов,  $\eta_{\text{эф}}$  - коэффициент эффективности ребер,  $t_{\text{к}}$  - температура конденсатора,  $t_{a}$  - температура атмосферы,  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи конденсатора.

Для системы ГЕТ, температура конденсатора может быть определена, если известна температура испарителя, которая в свою очередь равна температуре грунта на границе с трубой испарителя (Аникин и др., 2011).

$$t_{\rm K} = t_{\rm H} - \frac{0.5\rho gH}{\frac{dP_{\rm Hac}}{dt}} \tag{11}$$

 $t_{\rm u}$  - температура трубы испарителя,  $\rho$  - плотность хладагента, g - ускорение свободного падения, H - высота подъема конденсатора над испарителем,  $\frac{dP_{\rm hac}}{dt}$  - производная от давления насыщенных паров по температуре. Выражения (9) - (11) полностью описывают взаимодействие системы  $\Gamma$ ET с атмосферой.

Во второй главе были рассчитаны термополя на конкретных объектах и проведено сравнение теоретических данных с данными термометрии. В ходе работы, для расчета на примере нефтяного резервуара на Уренгойском месторождении были взяты данные четырех термоскважин (№365, №366, №368, №369) с термометрическими датчиками, расположенными под резервуаром. В таблице №1 приведены теоретические и экспериментальные показания этих датчиков и на рисунке №1 изображена схема их расположения.

Таблица №1.

Дата		369		366		368		365	
20.04.1990	<b>№</b> датчика	$t_{teor}(^{\circ}C)$	t <sub>exp</sub> (°C)	t <sub>teor</sub> (°C)	$t_{exp}(^{\circ}C)$	$t_{teor}(^{\circ}C)$	t <sub>exp</sub> (°C)	$t_{teor}(^{\circ}C)$	t <sub>exp</sub> (°C)
	1	-1,81	-3,28	-11,79	-10,32	-0,13	-1,96	-10,37	-10,51
	2	-7,43	-8,72	-12,1	-11,07	-5,96	-7,59	-10,64	-10,88
	3	-11,95	-11,58	-12,42	-11,68	-10,06	-10,3	-10,66	-10,96
	4	-12,08	-11,46	-12,11	-11,63	-10,45	-10,67	-10,49	-10,93
	5	-12,03	-11,61	-12,04	-11,8	-10,44	-10,64	-10,44	-10,82
	6	-12,03	-11,89	-12,03	-11,93	-10,43	-10,91	-10,43	-10,93
	7	-12,03	-11,85	-12,03	-11,95	-10,44	-10,28	-10,44	-10,96
	8	-12,07	-11,63	-12,08	-11,72	-10,45	-10,88	-10,45	-10,86
	9	-12,0	-11,13	-11,98	-11,15	-10,12	-10,43	-10,09	-10,4
	10	-7,83	-8,94	-7,74	-8,61	-6,3	-9,31	-6,26	-8,4
	11	-1,91	-6,04	-1,93	-5,51	-0,15	-6,55	-0,17	-6,33

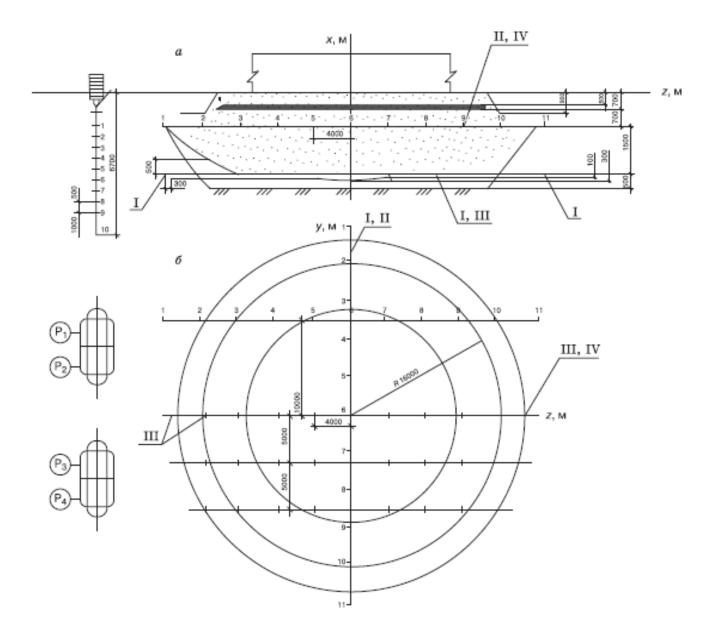


Рис.№1. Схема размещения термоскважин: a — вид сбоку;  $\delta$  — вид сверху; Ітермоскважина №368, ІІ-термоскважина №369, ІІІ-термоскважина №365, ІV-термоскважина №366;  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  — конденсаторные блоки.

Из рисунка №2 видно, что теоретические данные имеют тесную связь с экспериментальными данными, таким образом предложенная методика может быть использована для дальнейших расчетов температурных полей в грунтах и проведения стохастического прогноза.

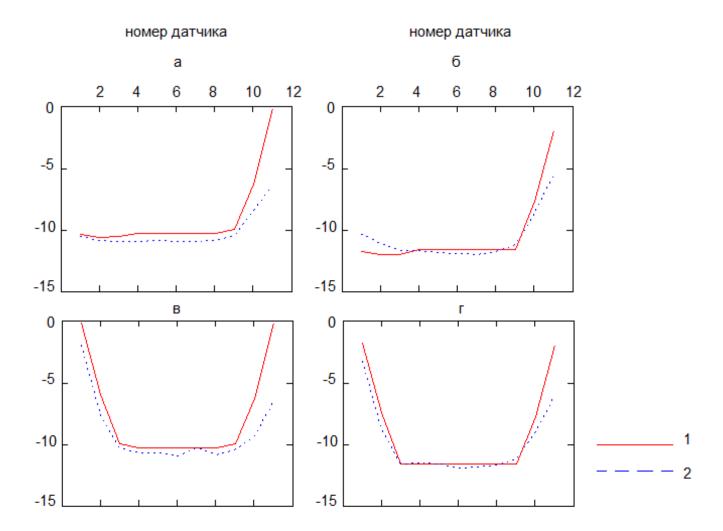


Рис.№2. Значения температуры для термоскважин на 20 апреля 1990г. с термометрическими датчиками: а — термоскважина №365; б — термоскважина №366; в — термоскважина №368; г — термоскважина №369; 1 — теоретические значения температуры; 2 — показания термодатчиков.

Тесная связь также получена при сравнении теоретических данных с экспериментальными при расчете термополей для объектов, расположенных на Ванкорском и Варандейском месторождениях. Среднеквадратичное отклонение теоретических температур от экспериментальных, как правило, меньше 1,5°C.

В третьей главе предлагается новый вид прогноза - стохастический прогноз, с использованием метода Монте-Карло, суть которого заключается в том, что на основании архивных данных метеостанций автором были построены распределения вероятностей среднемесячной температуры воздуха,

среднемесячной скорости ветра и среднемесячной толщины снежного покрова в период с 2007г. по 2012г. На основании этих распределений получаются для каждого расчетного года, значения случайных величин, соответствующие этим распределениям вероятности. Приводится расчет теплообмена в грунтах на конкретных объектах.

Генерируются 47 × 8 значений температуры воздуха и скорости ветра для каждого месяца, путем использования генераторов случайных чисел программы Маткад-14. В результате получены 47 вариантов изменения во времени метеорологических характеристик, продолжительностью 8 лет каждый, начав расчет с начала сентября и закончив концом августа для каждого из 47 вариантов развития событий. При этом толщина снежного покрова и уровень солнечной радиации берутся повторяющиеся из месяца в месяц.

Выделяется линия, совпадающая с центральной осью резервуара. Вычисляются температуры на этой оси, в точках, каждая из которых задается следующими координатами в расчетной области:  $x = x_j$  ( $0 \le j \le 11$ ), y = 50м, z = 50м. Значения  $x_j$  приведены в таблице  $\mathbb{N}$ 2.

Таблица №2. Значения  $x_i(M)$ .

j	0	1	2	3	4	5
$x_j$	0.7	1.2	1.7	2.2	2.7	3.2
j	6	7	8	9	10	11
$x_j$	4.2	5.2	6.2	7.2	8.2	9.2

Вычисляются температуры на линии, параллельной днищу резервуара, проходящей через центр этого резервуара перпендикулярно трубам охлаждающей системы в точках, задающихся следующими координатами в расчетной области: x = 0.7м,  $y = y_i$  ( $0 \le i \le 22$ ), z = 50м. Величины  $y_i$  приведены в таблице N23.

Таблица №3. Значения  $y_i$  (м).

i	0	1	2	3	4	5
$y_i$	17	20	23	26	29	32
i	6	7	8	9	10	11

$y_i$	35	38	41	44	47	50
i	12	13	14	15	16	17
$y_i$	53	56	59	62	65	68
i	18	19	20	21	22	-
$v_i$	71	74	77	80	83	-

Далее оценивается вероятность нахождения грунта в талом состоянии на центральной вертикальной оси и на оси, параллельной днищу резервуара, на примере системы «емкость с нефтью – СОУ – грунт» на Варандейском месторождении. Для оценки предположили, что распределение температур в грунте в каждой пространственной точке является нормальным распределением. Исходя из данной гипотезы, вероятность найти температуру больше нуля градусов Цельсия в точке с номером j на центральной вертикальной оси приведена в таблице  $\mathbb{N}$ 4.

Таблица №4. Значения вероятности найти грунт в талом состоянии на конец августа восьмого года на центральной вертикальной оси (%).

j	0	1	2	3	4	5
$Wc_{j}(\%)$	3.9	1.2	0.435	0.16	0.06	0.02
j	6	7	8	9	10	11
$Wc_j(\%)$	0.002	0	0	0	0	0

Вероятность найти температуру больше нуля на оси, параллельной днищу резервуара приведена в таблице №5.

Таблица №5. Значения вероятности найти грунт в талом состоянии на конец августа восьмого года на оси, параллельной днищу резервуара, (%).

i	0	1	2	3	4	5
$Wm_i(\%)$	98.8	0.27	3.1	3.9	4.1	4.1
i	6	7	8	9	10	11
$Wm_i(\%)$	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
i	12	13	14	15	16	17
$Wm_i(\%)$	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1
i	18	19	20	21	22	-
$Wm_i(\%)$	4.1	3.9	3.1	0.27	98.8	-

Из таблиц видно, что на глубине 0.7м, где пролегает ось, параллельная днищу резервуара, вероятность найти грунт в талом состоянии порядка четырех процентов, что говорит о надежности охлаждающей системы.

Аналогичный стохастический прогноз проводился для системы «емкость с нефтью – ГЕТ – грунт» на Ванкорском месторождении, он также подтверждает, что данная система обеспечивает термостабилизацию грунта.

В заключении отмечается, что разработанная в данной работе методика расчета функционирования охлаждающих систем, получила подтверждение в сравнении экспериментальных и теоретических данных. И, следовательно, вполне пригодна для описания процессов теплообмена в грунтах, охлаждаемых с помощью таких систем. Метод стохастического прогнозирования в отличие от стандартного метода позволяет исследовать все возможные варианты развития событий в течение любого количества лет эксплуатации системы «емкость с нефтью – ГЕТ – грунт» и вычислить в каждой точке пространства вероятность найти грунт в талом состоянии. Это в свою очередь имеет большое практическое значение при проектировании систем охлаждения грунтов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1. Создана программа, позволяющая моделировать работу СОУ под зданиями и сооружениями.
- 2. Рассчитаны температурные поля под пожарным депо на Ванкорском месторождении, под нефтяным резервуаром на Уренгойском месторождении и под резервуаром с нефтью на Варандейском месторождении.
- 3. Разработан метод решения задачи Стефана с учетом случайных изменений метеорологических характеристик. С помощью этого метода проведен стохастический (многовариантный) прогноз состояния грунтов под сооружениями, построенными на вечной мерзлоте, позволяющий определять вероятность нахождения грунта в талом состоянии при любом развитии событий и оценить эффективность работы СОУ.

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### ПУБЛИКАЦИИ В ИЗДАНИЯХ, РЕКОМЕНДОВАННЫХ ВАК РФ

- Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование системы охлаждения грунта под резервуаром с нефтью // Криосфера Земли. 2012. Т.XVI. №2. С.60-64.
- 2. Мельников В.П., Мельникова А.А., Аникин Г.В., Иванов К.С., Спасенникова К.А. Инженерные решения в строительстве на вечной мерзлоте в плане повышения энергоэффективности сооружений // Криосфера Земли. 2014. T.XVIII. N = 3. C.82-90.
- Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Расчет динамики промерзания грунта под воздействием одиночного термосифона // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. №1. С.51-56.
- 4. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Численный расчет нестационарных температурных полей в системе «резервуар с нефтью сезонное охлаждающее устройство» // Криосфера Земли. 2013. Т.XVII.  $N_2$ 3. С. 70-76.
- 5. Аникин Г.В., Плотников С.Н., Вакулин А.А., Спасенникова К.А. Стохастическое прогнозирование состояния грунтов под объектами, построенными на вечной мерзлоте // Вестник Тюменского государственного университета. 2013. N 27. C.46-53.
- 6. Аникин Г.В., Плотников С.Н., Вакулин А.А., Спасенникова К.А., Расчет стабилизации температуры основания под резервуаром с нефтью // Вестник ТГУ. 2009. № 6. С. 35-45.
- 7. Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Стационарные температурные поля в системе «емкость с нефтью-термостабилизаторы грунта» // Криосфера Земли. 2011. Т.XV. №2. С. 29-33.
- 8. Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование тепломассопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов // Криосфера Земли. 2011. T.XV. N 1. C. 33-39.

- 9. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Аникин Г.В., Спасенникова К.А., Залесский К.В. Сравнение экспериментальных данных и численного моделирования работы охлаждающей системы «ГЕТ» на примере пожарного депо Ванкорского месторождения // Криосфера Земли. 2014. Т.ХVIII. №1. С.65-70.
- 10. Аникин Г.В., Спасенникова К.А. О выборе хладагента для сезонных охлаждающих устройств типа «ГЕТ» // Криосфера Земли. 2014. Т.ХVIII. №2. С.31-33.

## РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ДРУГИХ ИЗДАНИЯХ

- Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Программа «Stohastic 3D».
   Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
   №2013612566. 2013.
- 12. Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Моделирование работы системы охлаждения резервуара с нефтью на Ванкорском месторождении // Труды X международной конференции по мерзлотоведению ТІСОР «Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире». Салехард, 25-29 июня 2012. С.12-13.
- 13. Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование системы охлаждения грунта под резервуаром с нефтью // Тезисы международной научнопрактической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной XX-летию ООО НПО «Фундаментстройаркос». Тюмень, 7-10 ноября 2011. С. 43-45.
- 14. Спасенникова К.А. Новый метод самосогласованного решения внутренней и внешней задач теплообмена при моделировании работы двухфазных сезонных охлаждающих устройств // Материалы Всероссийской научнопрактической конференции молодых ученых и специалистов, посвященная XX-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос» «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего севера». Тюмень. 2011. С. 39-42.