

А. В. Васькевич, А. В. Бакланов

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

Работа посвящена исследованию вопросов создания сеточных моделей возмущенных мерзлых грунтовых оснований. Формулируются задачи о применении средств геоинформационных систем для создания образов конечных элементов.

Задача анализа тепловых режимов мерзлых грунтовых оснований весьма актуальна как в процессе проектирования технологических объектов, так и при управлении и слежении за состоянием системы «окружающая среда — сооружение — грунт». На стадии предпроектного проектирования сооружений в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) исследуется тепловое воздействие объекта на невозмущенные грунты, выбираются мероприятия по искусственной заморозке оснований сооружений. Ввиду того, что решение задач с распределенными параметрами путем аналитических исследований очень трудоемко и возможно лишь в частных случаях, вычислительный эксперимент является основным средством анализа таких процессов.

Математическое моделирование систем заключается в построении приближенной дискретной модели [1]. В основе рассматриваемых вопросов лежит численная аппроксимация задачи типа Стефана [2], связанная с пространственной дискретизацией. В современных публикациях основное развитие при исследовании тепловых процессов в грунтах также связывается с совершенствованием математических моделей и вычислительных схем [3–5]. Одним из первых приближенных методов был метод конечных разностей, затем более популярным стал метод конечных элементов [6, 7]. В последнее время широкое применение получил метод граничных элементов [8, 9]. Он использован при реализации программного модуля URAN, предназначенного для решения трехмерных контактных задач [10].

Вопросы построения сеток конечных элементов изучены в различных предметных областях: например, исследование тепловых полей двигателей, расчеты строительных конструкций, задачи распознавания образов историко-археологических объектов, а также системы гражданской и промышленной безопасности. Наиболее часто при построении сеточных моделей используются типовые конечные элементы, в строительстве — стержневые, поверхностные, смешанные и т. п. [11]. Однако при решении конкретных задач часто приходится создавать новые программы. Так, разработчики программного комплекса «FEM models» [12] постарались создать удобную среду, предназначенную для построения новых конечно-элементных моделей. С применением этой программы были реализованы модули для расчета взаимодействий здания и оснований, процессов промерзания и протаивания грунтов. Однако в любой задаче приходится искать компромисс между детальностью описания среды и трудоемкостью расчетов ее состояния. При этом необходимой точности расчетов можно добиться не только путем увеличения числа конечных элементов, но и правильным выбором их формы. Опираясь на знания о распределении линий потенциалов, силовых, тепловых, электромагнитных полей, можно определить наиболее подходящую для конкретного случая конструк-

цию конечного элемента. Данная работа направлена на обоснование рациональной сетки конечных элементов и технологии автоматизированного конструирования их графических образов.

При анализе и выборе численных схем часто учитываются такие свойства, как устойчивость, аппроксимация, сходимость, точность полученных решений [4]. Однако оптимизация вычислительной модели, как и повышение ее точности, напрямую связана с детальностью описания свойств среды и, как следствие, с трудоемкостью подготовки и ввода исходных данных. Если задавать параметры сеточной модели по некоторым аналитическим законам, то она может получиться либо грубой, либо большой размерности, поэтому на практике лучше исходить из соображений, основанных на знании физики процесса.

При анализе теплофизических свойств мерзлых грунтов, являющихся основанием свайных сооружений, исходные геотехнологические сетки, обусловленные геотехногенным влиянием, задаются на основе знаний о потенциалах температурных полей. Тогда при рассмотрении одиночной сваи эталоном будут симметричные кольца. Нарушить симметрию в таком случае может неоднородность описываемой среды. При этом для более детального анализа важной задачей является доуточнение сетки в процессе эксперимента или по его результатам, когда можно уже предположить, где и на сколько необходимо уплотнить сетку для получения более достоверных результатов. Таким образом, при построении сеточной модели для анализа температурных режимов мерзлых грунтовых оснований необходимо сочетать нерегулярные конечные элементы, обусловленные влиянием среды, с регулярными элементами, обусловленными геотехногенным влиянием. В связи с тем, что географические информационные системы (ГИС) изначально были созданы для работы с нерегулярными графическими объектами [13], ГИС-технологии в данной работе рассматриваются как основа автоматизированного формирования сеточных моделей и автоматического составления и расчета параметров математических моделей мерзлых грунтовых оснований.

Технология вычислительного анализа включает в себя следующие основные составляющие: автоматизированное описание объекта обследования; управление заданием и счетом; управление выводом и визуализацией счета. Использование возможностей современных ГИС при исследовании температурных режимов ММГ позволит автоматизировать этапы описания объекта и визуализации результатов исследований.

Объект, подлежащий исследованию, можно записать в виде

$$\theta(\mathbf{x}, t) = P(\mathbf{a}, \mathbf{u}(t) | \mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in \mathbf{X} \subset R^3, \quad t \in T. \quad (1)$$

Здесь $\theta(\mathbf{x}, t)$ — моделируемые переменные состояния объекта исследования, зависящие от пространственных координат — \mathbf{x} и времени — t ; \mathbf{a} — свойства среды (параметры), $\mathbf{u}(t)$ — управляемые входы, P — класс математических соотношений, описывающих модель процесса.

Разработка вычислительной модели основана на процедуре дискретизации. Суть дискретизации состоит в переходе от вида (1) к виду

$$\theta(k) = P_D(\mathbf{a}, \mathbf{u}(k), k), \quad (2)$$

где $k = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ — параметр дискретного времени

($\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(t_k)$, $t_{k+1} = t_k + \Delta t$, Δt — шаг по времени);

$\boldsymbol{\theta}(k) = \text{col}[\theta_1(k) \dots \theta_n(k)]$ — вектор осредненного температурного состояния конечных элементов (КЭ), полученных вследствие пространственной дискретизации области \mathbf{X} .

Полученная дискретная модель (2) является приближенным аналогом нелинейной модели (1). Суть вычислительного анализа чаще всего сводится к подбору входных переменных $\mathbf{u}(k)$, при которых обеспечиваются предписанные свойства распределения температур, например $\mathbf{u}(k) : \boldsymbol{\theta}(k) - \bar{\boldsymbol{\theta}} \leq \mathbf{0}, \forall k \geq k_m$.

В ходе вычислительного анализа могут обосновываться требования о повышении точности расчетов в особых приближенных к точкам возмущения зонах среды, что в общем случае ведет к реконструкции преобразования $P \rightarrow P_D \langle \Delta t, T, \Delta T | x_{i,j} \rangle$ по временным $\langle \Delta t, T, \Delta T \rangle$ и пространственным $\langle x_{i,j} \rangle$ признакам, где Δt — шаг дискретизации по времени, T — интервал анализа, ΔT — интервал повторных запусков.

Заложенные в систему средства автоматизации вычислительного анализа, обеспечивающие вариации внешних параметров $\langle \mathbf{u}(k) \in U \rangle$ и внутренних характеристик модели $\langle \Delta t, T, \Delta T | x_{i,j} \rangle$, устанавливают иерархию уровней совершенствования вычислительных средств по важнейшей характеристике — трудоемкости вычислительных экспериментов. Наиболее трудоемкими являются операции, связанные с реконструкцией схемы конечных элементов $\langle x_{i,j} \rangle$. Ниже рассматриваются подходы к решению задачи автоматизации реконструкции схемы КЭ на основе геоинформационных технологий.

Суть автоматизированного описания распределенных сред заключается в переходе от координат пространства \mathbf{x} к конечным элементам. Рассмотрим задачу растепления ММГ, возмущенных свайными основаниями. Наиболее разработанной постановкой задачи теплообмена в грунтах с фазовыми переходами поровой влаги является задача типа Стефана [2]. Перейдем к анализу двумерной задачи типа Стефана для ММГ, возмущенных вертикальной свайной конструкцией (рис. 1).

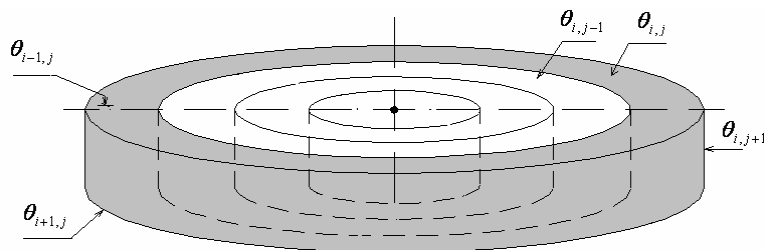


Рис. 1. i, j -й конечный элемент цилиндрической схемы ММГ

Используя ряд упрощений, запишем уравнение для i, j -го конечного элемента [14], представленного на рис. 1:

$$\Delta V_{i,j} \frac{d}{dt} c_{i,j}(\theta_{i,j}) = -\left(\frac{1}{2} S_j (\lambda_{i-1,j} + 2\lambda_{i,j} + \lambda_{i+1,j}) + \frac{1}{2} L_i (\lambda_{i,j-1} + 2\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1})\right) \theta_{i,j} + \frac{1}{2} S_j (\lambda_{i-1,j} + \lambda_{i,j}) \theta_{i-1,j} + \frac{1}{2} S_j (\lambda_{i,j} + \lambda_{i+1,j}) \theta_{i+1,j} + \frac{1}{2} L_i (\lambda_{i,j-1} + \lambda_{i,j}) \theta_{i,j-1} + \frac{1}{2} L_i (\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}) \theta_{i,j+1}.$$

В приведенном уравнении $\Delta V_{i,j}, S_j, L_i$ — геометрические параметры КЭ; $\theta_{i,j}$ — значение температуры в i, j -м КЭ, а $c_{i,j}$ и $\lambda_{i,j}$ — теплофизические параметры грунта, определяемые распределенными свойствами исследуемой среды — \mathbf{a} . Согласно [15] типовой набор свойств, фиксируемый географическими картами локального уровня, включает: $\mathbf{a} = \langle \text{покров; состав грунтов; температурные условия; влажность; льдистость; плотность; засоленность} \rangle$. Геоинформационные системы позволяют частично автоматизировать процедуры ввода и реконструкции визуально-графической информации.

При изучении свойств среды наиболее типичной входной информацией являются экспериментальные данные, полученные с измерительных скважин. Исходный геоинформационный образ представляется точечной моделью (рис. 2а) с привязанными таблицами атрибутивных данных. Пример пространственной экстраполяции теплофизических свойств среды, представленный на рис. 2, включает типовые стадии, реализуемые программными средствами геоинформационных платформ: триангуляция (как правило Делоне), рис. 2б, полигональная векторизация многоугольниками близости Вороного, рис. 2в, либо векторизация по технологии изолиний с равновеликими значениями параметров среды, рис. 2г.

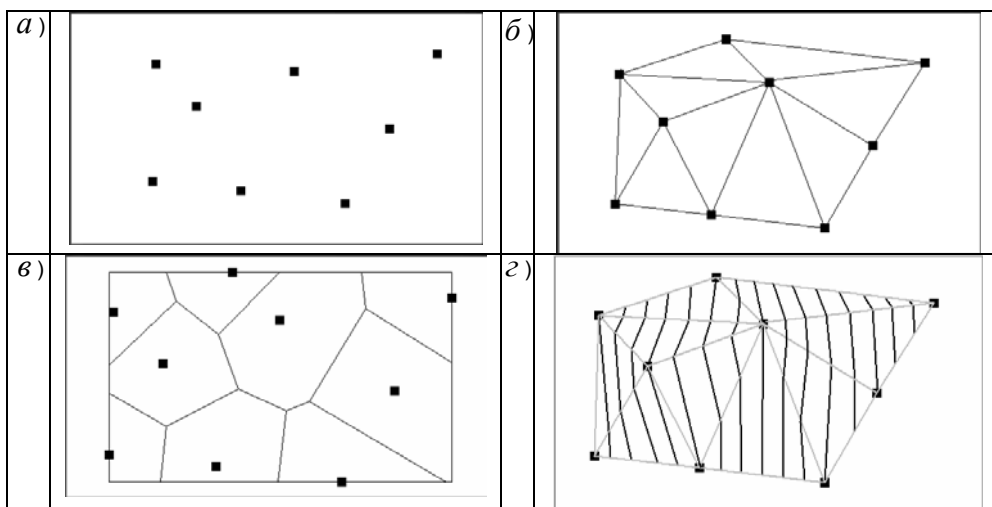


Рис. 2. Описание среды средствами ГИС

Полученные послойные векторные картографические образы пространственных свойств среды \mathbf{a} по сути представляют собой теплофизическую модель конечных элементов ММГ, которые служат основой для вычисления параметров математической модели на основании объединения с геотехногенной схемой конечных элементов (рис. 3).

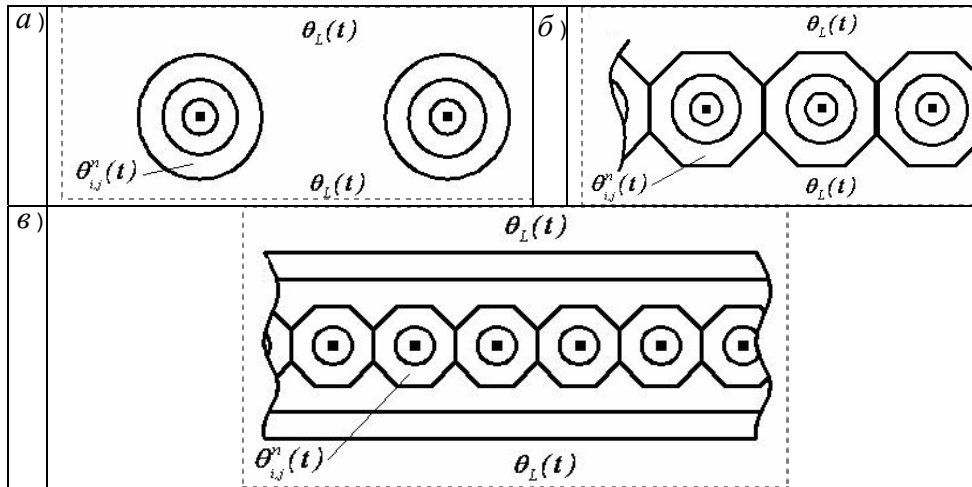


Рис. 3. Виды сеток геотехногена

Геоинформационный образ КЭ геотехногенной схемы определяется моделями тепловых возмущений. Создание экономических схем КЭ преследует одновременно две взаимоисключающие цели: создание математической модели с минимальной размерностью (минимальное количество КЭ), что качественно упрощает процедуру задания начальных условий, технологию анализа; сохранение заданных показателей по точности, что связано с дроблением КЭ. Таким образом, при построении сеточной модели важно попасть в типовые образы потенциалов полей, чтобы при заданной точности обойтись минимальным количеством КЭ. Исходные образы КЭ следует искать в однородных симметричных структурах. Так, для одиночной сваи наиболее экономичной является послойно-цилиндрическая схема КЭ, как на рис. 3а. Однако геотехнологические схемы КЭ в линейно структурированных свайных основаниях видоизменяются в зависимости от близости свайных опор. Возможные топологии КЭ иллюстрируются на рис. 3а–в. Схема на рис. 3а по сути эквивалентна моделям одиночных свай, на рис. 3б поверхность теплообмена с невозмущенной средой $\theta_L(k)$ сокращается, в случае рис. 3в имеем переходную структуру от модели точечных возмущений к модели линейного возмущения.

Алгоритмизация процедуры формирования геоинформационной геотехнологической сетки КЭ по типизированным точечным возмущениям — наиболее важная задача вычислительного эксперимента. Результатирующим этапом геоинформационного анализа и синтеза теплодинамической модели ММГ является построение объединенного образа схемы конечных элементов модели $P_D \langle \Delta t, T, \Delta T | x_{i,j} \rangle$ на основе объединения теплофизических (рис. 2) и геотехнологических (рис. 3) схем и осреднения параметров модели.

Пример геоинформационного образа результирующей модели $P_D \langle \Delta t, T, \Delta T | x_{i,j} \rangle$ приведен на рис. 4, где каждый конечный элемент геотехнологической схемы имеет определенное значение теплофизических параметров $\mathbf{a}_{i,j}$.

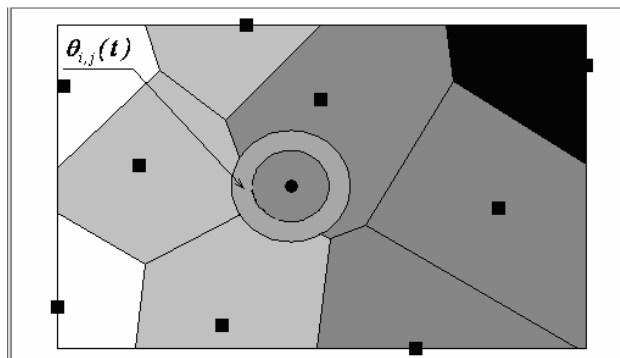


Рис. 4. Объединение теплофизической и геотехнологической моделей

Таким образом, при анализе теплофизических свойств мерзлых грунтовых оснований с использованием ГИС предлагаем решать следующие задачи: автоматизированное построение сеточной модели ММГ, учитывающей взаимовлияние свайных конструкций и неоднородность свойств среды; а также автоматическое составление матриц теплопередач и соответственно системы уравнений математической модели ММГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. САПР: Система автоматизированного проектирования: Учеб. пособие для вузов: В 9 кн. Кн. 4. Математические модели технических объектов / В. А. Трудоношин, Н. В. Пивоварова; Под ред. И. П. Норенкова. — Мн.: Выш. шк., 1988. — 159 с.
2. Ершов Э. Д. Общая геокриология: Учеб. для вузов. — М.: Недра, 1990. — 559 с.
3. Попов Ф. С. Вычислительные методы инженерной геокриологии. — Новосибирск: Наука, 1995. — 136 с.
4. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена: Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. — 544 с.
5. Пермьяков П. П., Аммосов А. П. Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне. — Новосибирск: Наука, 2003. — 224 с.
6. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 428 с.
7. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. — М.: Наука, 1980. — 256 с.
8. Бреббия К., Телес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 524 с.
9. Алейников С. М. Метод граничных элементов в контактных задачах для упругих пространственно неоднородных оснований. — М.: Изд-во «АСВ», 2000. — 754 с.
10. Алейников С. М., Вахтин А. А. Генерация гранично-элементных сеток для расчета оснований и фундаментов мостовых опор в пространственной постановке // Науч. вестн. Воронеж. гос. архитектурно-строительного ун-та. — 2004. — Вып. 2. — С. 3–11. — (Сер. Дорожно-транспортное строительство).
11. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 195 с.
12. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г., Парамонов В. Н. Программная система для создания моделей и решения задач строительства и реконструкции с помощью МКЭ «FEM models» // Реконструкция городов и геотехническое строительство. — Интернет-журн. — 2000. — № 2. — Режим доступа: <http://www.georec.spb.ru/mag/index.htm>, свободный.

13. *Гиттис В. Г., Ермаков Б. В.* Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 256 с.

14. *Соловьев И. Г., Паньшин А. Е.* Алгебраический метод анализа теплодинамики мерзлого грунта на основе гармонической линеаризации // Вестн. кибернетики. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2006. — № 5. — С. 16–21.

15. *Дроздов Д. С.* Информационно-картографическое моделирование природно-техногенных сред в геокриологии: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — Тюмень, 2004. — 49 с.

A. V. Vas'kevitch, A. V. Baklanov

COMPUTER TECHNOLOGIES FOR GEO-DATA-PROCESSING ANALYSIS OF THERMAL PHYSICAL PROPERTIES OF FROZEN SOIL FOUNDATIONS

The paper investigates questions of creating grid models of frozen soil foundations. Subject to formulation being problems on using resources of geo-data-processing systems to create images of finite elements.