

УДК: 624.131.53:004.94

## **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЗАГЛУБЛЕННЫХ ЗДАНИЙ**

Никифорова Т.Д., Савицкий Н.В., Несин А.А.

Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия  
строительства и архитектуры»  
г. Днепропетровск, Украина

**АННОТАЦИЯ:** Виконано тестування програмних комплексів розрахунку температурних полів. Розглянуто особливості моделювання теплопередачі заглиблених будівель.

**АННОТАЦИЯ:** Выполнено тестирование программных комплексов расчета температурных полей. Рассмотрены особенности моделирования теплопередачи заглубленных зданий.

**ABSTRACT:** The testing of software complexes for temperature fields calculation was performed. Peculiarities of heat transfer modeling of earth sheltered buildings were determined.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** теплопередача, тепловой поток, заглубленное здание, теплообмен.

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Заглубленные сооружения занимают промежуточное положение между наземными зданиями и подземными сооружениями и характеризуются особенностями теплообмена, присущими как наземным, так и заглубленным зданиям. Процессы тепло- и массопереноса в системе «воздушная среда заглубленного здания – грунтовый массив – наружный воздух» помимо климатических факторов, определяются геолого-геотермическими факторами к которым относятся свойства горных пород, окружающих заглубленные сооружения, гидрогеологические условия и температура пород на глубине строительства и в радиусе теплового влияния. На сегодня существуют достаточно апробированные методики расчета теплового режима наземных и подземных зданий [1, 2]. Для решения задач проектирования заглубленных зданий такие методики отсутствуют.

**Целью** данной работы является исследование особенностей моделирования теплопереноса в заглубленных зданиях с учетом взаимодействия с грунтовым массивом. Проведение тестирования программных комплексов путем сравнения полученных результатов расчёта процесса теплопереноса на фрагментах конструкций, имеющих аналитическое решение или известное численное решение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В основу метода расчета температурных полей положено решение системы дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. Указанную систему аппроксимируют системой алгебраических уравнений известным методом конечных разностей. Как известно, в основе конечно-разностного метода решения уравнения теплопроводности Фурье [3], описывающего нестационарную теплопередачу через многослойное ограждение, лежит замена производных искомой функции температуры по времени и координате конечно-разностными отношениями с помощью значений сеточной функции в узлах сетки [4]. Тогда задача теплопроводности сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно значений сеточной функции на каждом слое.

Методы решения систем линейных уравнений делятся на прямые и итерационные [4]. Решение линейных систем с использованием итерационных методов имеет определенные преимущества перед прямыми методами, однако, при этом сходимость итераций может быть очень медленной, поэтому ищутся эффективные пути её ускорения.

Для тестирования программ расчета теплопередачи было выбрано три наиболее распространённых программных комплекса: Heat 2 (Тандер-Бей, Канада), THERMA (Калифорния, США) и Elcut (Санкт-Петербург, Россия). Тестирование программ выполнялось путем сравнения результатов расчета задачи двумерного теплообмена с эталонными значениями, приведёнными в ДСТУ ISO 10211-1:2005 [5].

Согласно требованиям ДСТУ ISO 10211-1:2005, разница между значениями температуры полученными в программных комплексах и эталонными значениями не должны превышать 0,1 К, разница между тепловым потоком – 0,1 Вт/м. Геометрическая модель для решения задачи двумерного теплообмена показана на рис. 1.

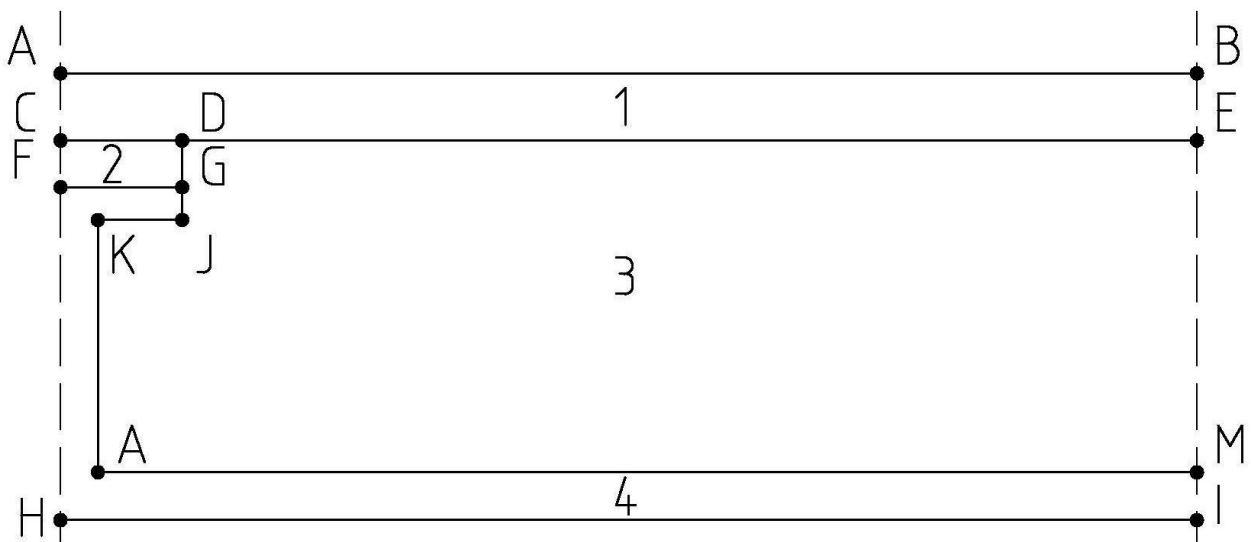


Рис. 1. Модель задачи двумерного теплообмена

Геометрические размеры модели: AB=500 мм, AC = 6 мм, CD= 15 мм, CF=5 мм, EM=40 мм, GJ=1.5 мм, IM=1.5 мм, FG-KJ=1.5 мм.

Коэффициенты теплопроводности: 1 - 1,15 Вт/м·К; 2 - 0,12 Вт/м·К; 3 - 0,029 Вт/м·К; 4 - 230 Вт/м·К.

Граничные условия: AB: 0° С с  $R_{se}=0.06 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ ; HI: 20° С с  $R_{si}=0.11 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ .

В табл. 1 приведены результаты расчёта задачи двумерного теплообмена.

Таблица 1

## Результаты расчета задачи двумерного теплообмена

Эталонные значения			Heat2		Elcut		Therma	
Вершины	Значения температур в точках, °C	Суммарный тепловой поток, Вт/м	Значения температур, °C	Суммарный тепловой поток, Вт/м	Значения температур, °C	Суммарный тепловой поток, Вт/м	Значения температур, °C	Суммарный тепловой поток, Вт/м
<b>A</b>	<b>7.1</b>	<b>9,5</b>	7.05	9.43	7.06	9.51	7.1	9,54
<b>C</b>	<b>7.9</b>		7.68		7.88		7.9	
<b>F</b>	<b>16.4</b>		16.41		16.39		16.4	
<b>H</b>	<b>16.8</b>		16.77		16.76		16.8	
<b>D</b>	<b>6.3</b>		6.31		6.29		6.3	
<b>G</b>	<b>16.3</b>		16.13		16.26		16.3	
<b>B</b>	<b>0.8</b>		0.76		0.76		0.8	
<b>E</b>	<b>0.8</b>		0.83		0.804		0.8	
<b>I</b>	<b>18.3</b>		18.33		18.33		18.3	

Время расчета задачи двумерного теплообмена в программных комплексах составило: Elcut – 2 с; Therma – 1 с; Heat 2 – 32.3 ч.

Точность результатов, полученных в программе Heat2, не соответствует требованиям ДСТУ ISO 10211-1:2005.

Для расчёта двухмерного температурного поля фрагмента заглубленного здания с помощью программных комплексов исходные данные формируют согласно следующим этапам (рис. 2):

а) выбирают участок ограждающей конструкции, двухмерной в отношении распределения температур;

б) составляют расчетную схему изучаемой части ограждающей конструкции путем ее упрощения. При этом заменяют сложные конфигурации участков, например, криволинейные более простыми. Наносят на расчетную схему границы области исследования и оси координат. Выделяют участки с различными теплотехническими характеристиками, и указывают условия теплообмена на границах. Проставляют все необходимые размеры;

в) расчленяют область исследования на элементарные блоки линиями, параллельными координатным осям, выделяя отдельно участки с различными коэффициентами теплопроводности; при этом размеры элементарных блоков для отдельных участков могут отличаться по размерам, т.е. разбивка на блоки может быть неравномерной. Линии разбивки должны совпадать с границами участков с различными теплопроводностями. В тех частях, где ожидается резкое изменение температуры, следует проводить более детальную разбивку;

г) проставляют координаты вершин полигонов, ограничивающих участки области с различными теплопроводностями, и координаты вершин прямоугольников, образующих границы исследуемой области. Нумеруют участки и границы исследуемой области и вершины областей теплопроводностей, температур (или тепловых потоков) на границах или окружающего воздуха и коэффициентов теплоотдачи и тепловосприятости;

д) составляют комплект численных значений исходных данных;

е) исходные данные задачи передаются на счет с указанием о графическом выводе результатов или без него.

Особенность моделирования теплопереноса в заглубленных зданиях заключается в необходимости учета грунтового массива в процессе передачи тепла.

Для определения области моделирования необходимо задать теплотехнические характеристики грунта и начальное распределение температур в грунтовом массиве.

Изменение температуры в толще грунта, колебания и средние годовые ее значения на небольшой глубине являются важными показателями теплового режима, в котором будет находиться заглубленное здание.

Земля сглаживает амплитуду колебаний, как суточных, так и годовых температур. Изменение сезонных температур сказывается в земле на глубине лишь нескольких метров, между тем изменение температуры воздуха в течение часов или суток на температуру земли практически не влияет.

На большей глубине отмечаются сезонные колебания температуры, а изменения температуры наблюдаются только спустя продолжительное время.

При размещении в массиве грунта заглубленного здания, в котором поддерживается температура, отличная от естественной температуры, тепловой режим грунтов основания нарушается. Чем дольше существует такое здание, тем на большее расстояние оно влияет и, тем больше зона нарушенного температурного поля. Подземное здание можно, в общем виде, представить как обычное здание с увеличивающейся во времени толщиной ограждающих конструкций, граничащих с массивом грунта.

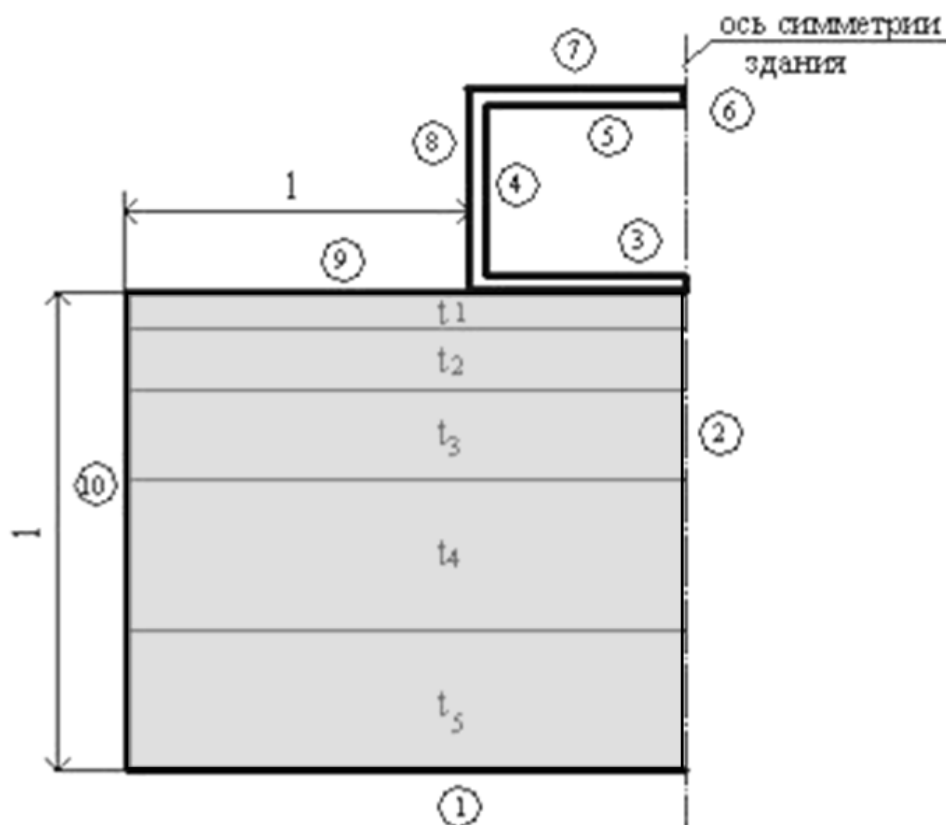


Рис. 2. Расчетная схема здания для определения размеров зоны моделирования

Тепловой режим заглубленного здания и грунтов основания в свою очередь будет зависеть от температуры наружного воздуха в рассматриваемом регионе.

Суровость климата оценивается такими показателями, как произведение температуры на время, характеризующее сумму разностей температуры наружного и внутреннего воздуха для количества времени, равного отопительному периоду. Эта величина нормируется согласно данным ДСТУ – Н Б В.1.1-27:2010 [6]. При этом для оценки теплотребления принимается период со средней суточной температурой воздуха  $\leq 8^{\circ}\text{C}$  и средняя температура для этого периода.

Определение размеров зоны моделирования заключается в постепенном увеличении размеров зоны до тех пор, пока при расчёте устанавливается постоянное значение теплового потока. При этом размеры участка моделирования увеличиваются одновременно на одинаковую величину.

Результаты расчета значений теплового потока в зависимости от размеров зоны моделирования приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Зависимость величины теплового потока от размеров зоны моделирования

Размер зоны l, м	Тепловой поток, Вт/м	Размер зоны l, м	Тепловой поток, Вт/м
1	571,29	10	564,03
1,5	565,52	15	564,81
2	559,39	20	565,19
2,3	558,8	25	565,39
2,5	558,52	30	565,49
2,7	558,71	35	565,54
3	559,09	40	565,55
4	561,28	45	565,55
5	562,04	50	565,52

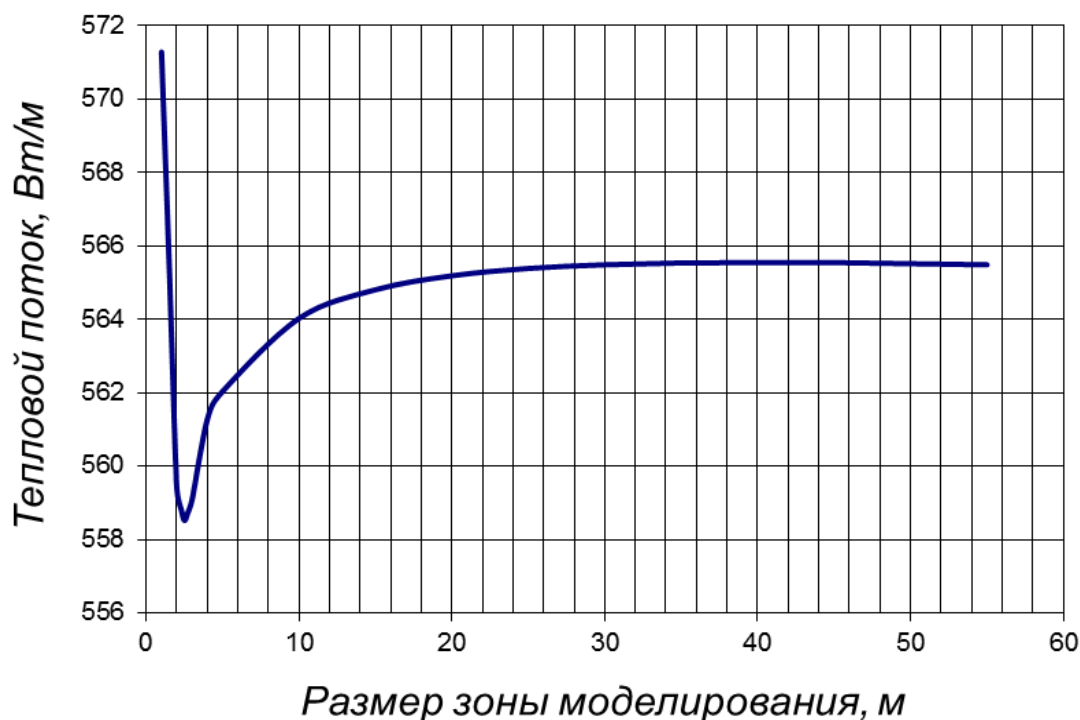


Рис. 3. График зависимости величины теплового потока от размеров зоны моделирования

Погрешность расчета определялась по отношению к результатам расчёта, полученным на предыдущем шаге. В результате вычислений установлено, что при размерах зоны моделирования  $l = 20$  м погрешность вычислений будет составлять 0,07%. Таким образом, при исследовании тепловых потерь заглубленных зданий минимальный размер зоны моделирования составляет 20х20 м.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлены минимальные размеры грунтового массива для моделирования теплопередачи, которые составляет 20х20 м. При этом погрешность вычислений тепловых потоков составляет менее 0,1%.

Проведено тестирование программных комплексов путем сравнения полученных результатов процесса теплопереноса с эталонными значениями, указанными в ДСТУ ISO 10211-1:2005.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по теплотехническому расчёту и проектированию ограждающих конструкций зданий. — М.: Стройиздат, 1985. — 141 с.
2. Теплофизические расчеты объектов народного хозяйства, размещаемых в горных выработках/Ин-т техн. Теплофизики АН УССР.— М., 1998. — 80 с.
3. Савицкий Н. В. Совершенствование расчета теплопередачи через ограждающие конструкции зданий численным методом / Савицкий Н.В. Куличенко И.И., Никифорова Т.Д. // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научных трудов. Вып. 35. — Д.: ПГАСА, 2005 — С.7-17.
4. William Morgan. Buildings as Landscape: Five Current Projects by William Morgan. - Oklahoma: Architectural Record, 1972. — 543 p.
5. Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Обчислення теплового потоку та поверхневої температури. Частина 1. Загальні методи (ISO 10211-1:1995, IDT): ДСТУ ISO 10211-1:2005 — [Чинний від 2005-12-02]. — К.: Держспоживстандарт України, 2008 — 38 с. — (Національні стандарти України).
6. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія: ДСТУ – Н Б В.1.1-27:2010. — [Чинний від 2011-11-01]. — К.: Мінрегіонбуд України, 2011 — 123 с. — (Національні стандарти України).

Статья поступила в редакцию 02.04.2013 г.