



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Рубцовский индустриальный институт (филиал)  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»  
(РИИ АлтГТУ)

ДЕНИСЕНКО А.А.

## **РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В МЕРЗЛОМ ГРУНТЕ В ГОДОВОМ ПЕРИОДЕ**

Методические разработки  
по дисциплине «Проектирование зданий для экстремальных условий»  
для студентов направления подготовки  
08.03.01 «Строительство» всех форм обучения

Рубцовск 2021

УДК 624.131.7

Денисенко, А.А. Расчет температурного поля в мерзлом грунте в годовом периоде [Электронный ресурс]: Метод. разработки по дисциплине "Проектирование зданий для экстремальных условий"/ А.А. Денисенко; РИИ. - Электрон. дан. - Рубцовск:2020. - 26 с.

Содержат указания по организации расчета деятельного слоя вечномерзлого грунта с применением современных программных комплексов

Рассмотрены и одобрены  
на заседании каф. СиМ  
РИИ АлтГТУ  
Протокол № 8 от 26.04. 2021г.

Рецензент:

И.о. заведующего кафедрой СиМ  
к.т.н. О.А.Михайленко

## **Введение**

Исследование температурного поля в годовом периоде необходимо во многих случаях, например, при проектировании зданий на вечной мерзлоте с учетом параметров «чаши оттаивания».

В работе показаны приемы учета изменения теплотехнических характеристик грунтов в процессе фазовых переходов.

В методических рекомендациях использованы материалы выпускной квалификационной работы Ткачук Е.А., выполненной под руководством автора в 2012 году на кафедре СиМ РИИ АлтГТУ. В этой работе приведены ссылки на использованные источники. Основные материалы опубликованы в журнале «Ползуновский вестник № 1, 2012».

## **Компьютерное моделирование температурного поля в грунтовом массиве**

Выполняется моделирование температурного поля в грунте в районе города Новый Уренгой в годовом периоде.

### **Создание модели**

Рассмотрена модель «бесснежная долина». Для решения задачи применен программный комплекс (далее ПК) FlowVision.

### **Расчетная область**

Поскольку задача является одномерной, размеры и форма области в плане могут быть любыми. Глубина области должна быть не меньше глубины границы нулевых амплитуд сезонных колебаний температуры.

Примем следующую форму и размеры расчетной области (рис. 1); прямоугольный параллелепипед с размерами в плане  $10 \times 10 \text{ м}^2$  и с высотой 30 метров. Область создаем средствами трехмерной графики AutoCAD и экспортируем ее в формат stl, после чего геометрия пригодна для дальнейшего решения в среде .FlowVision.

Задание размеров в плане выполняется в плоскости XOY, глубина изменяется вдоль оси Z.

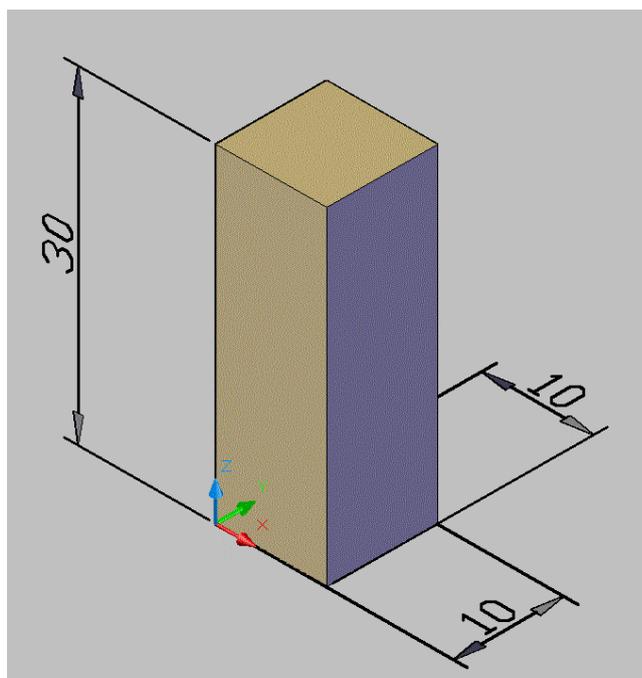


Рисунок 1

### **Математическая модель**

Для решения задачи используется модель *твёрдый материал* (рис. 2).

Материал считается однородным, без примесей. Кроме того, внутри области отсутствуют энергетические особенности, такие как излучение и т.д.

### **Физические параметры**

Принимаем начальную температуру расчетной области равной минус два градуса относительно опорных параметров (рис. 3). Эта температура назначена равной  $T_0$  по условию рассматриваемой задачи.

Далее температура будет задаваться в градусах Цельсия (как разность абсолютной температуры в Кельвинах и опорного значения температуры). Давление в данной задаче остается постоянным.

Поскольку задача является нестационарной, температурное поле выстроится автоматически в процессе расчета в течение определенного времени.

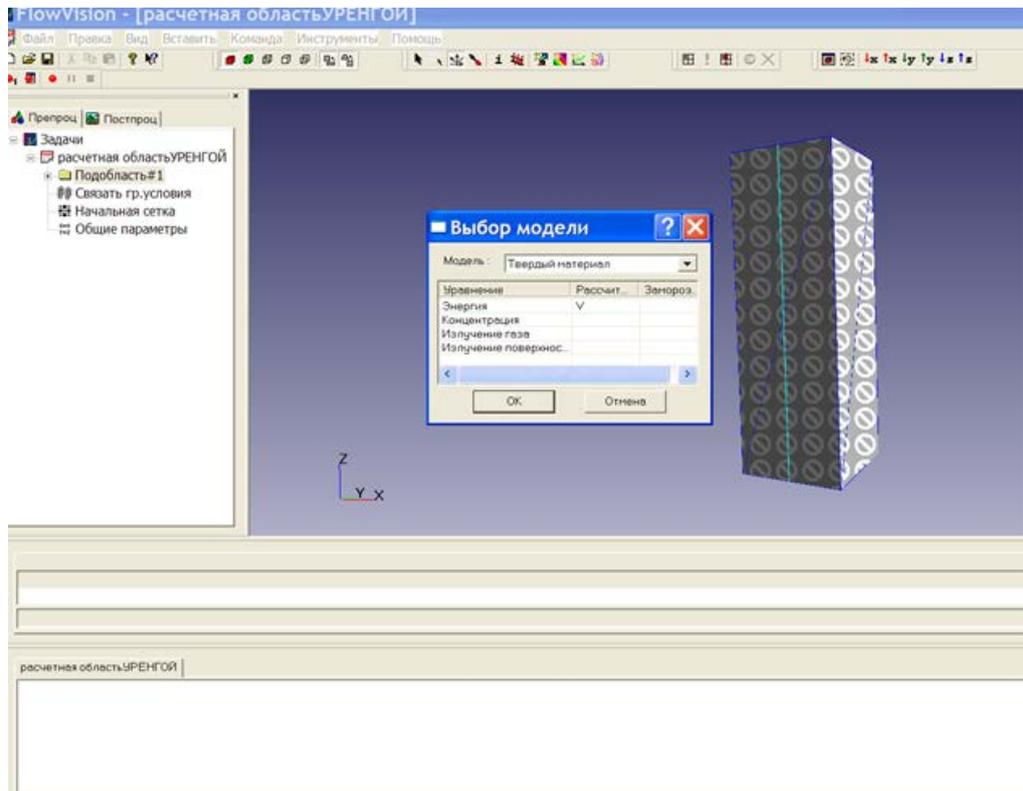


Рисунок 2

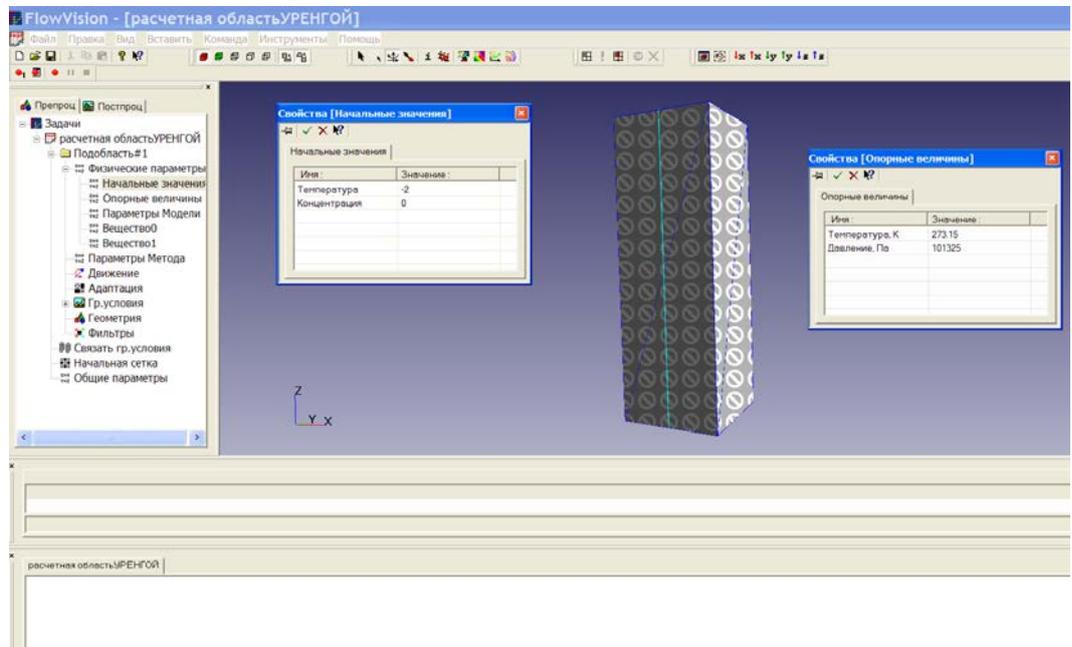


Рисунок 3

## Вещество

Расчетная область рассматривается как однородное вещество без примесей, поэтому задаем свойства только одного вещества – Вещество0 (рис. 4). Для задания свойств вещества использована опция загрузки из базы.

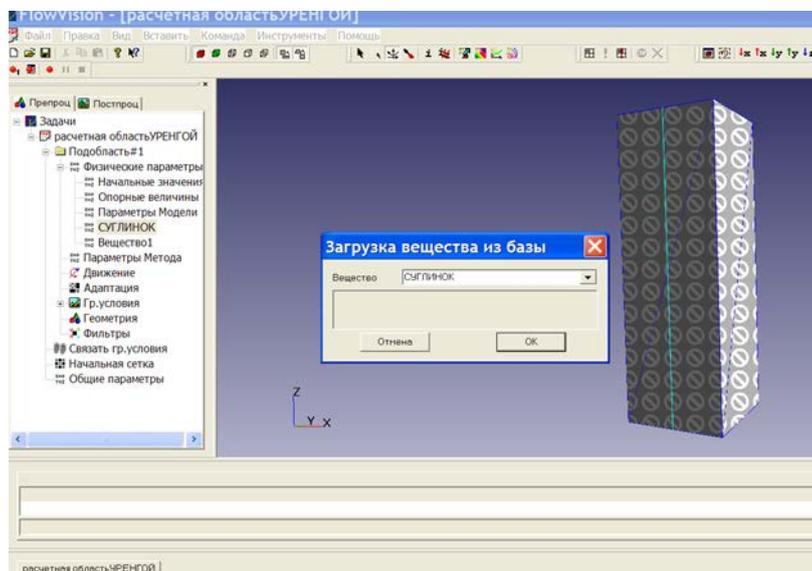


Рисунок 4

Суглинок не является стандартным веществом программного комплекса, поэтому вещество и его свойства предварительно заносим в редактируемую базу веществ.

Для расчетов выразим необходимые параметры в единицах ПК.

Плотность мерзлого грунта найдем по плотности сухого грунта и его влажности

$$\rho = (1 + w_{tot}) \times \rho_d \quad .$$

Значения коэффициентов теплопроводности выразим в стандартных единицах СИ.

Поскольку в ПК используется не объемная теплоемкость вещества, а его удельная теплоемкость переведем соответствующие значения в нужные

единицы, учитывая коэффициенты перехода в систему СИ и разделив заданные значения объемной теплоемкости на величину плотности.

Для учета зависимости теплофизических величин от температуры грунта воспользуемся приемом, описанным в работе, где применена эффективная теплоемкость на участке фазовых переходов.

Теплота таяния (замерзания) грунта вычисляется по формуле

$$L_v = L_0 \times (w_{tot} - w_w) \times \rho_d$$

Таким образом, получим следующие значения параметров, необходимых для расчета.

*Плотность вещества  $\rho = 1820 \text{ кг/м}^3$ ;*

*Теплопроводность грунта в мерзлом состоянии  $\lambda_f = 1,57 \text{ Вт/(м } ^\circ\text{C)}$ ;*

*Теплопроводность грунта в талом состоянии  $\lambda_{th} = 1,45 \text{ Вт/(м } ^\circ\text{C)}$ ;*

*Теплоемкость грунта в мерзлом состоянии  $C_f = 1193 \text{ Дж/(кг } ^\circ\text{C)}$ ;*

*Теплоемкость грунта в талом состоянии  $C_{th} = 1652 \text{ Дж/(кг } ^\circ\text{C)}$*

*Теплота фазовых переходов (таяния-замерзания грунта)*

$$L_v = 3,35 \times 10^5 \times (0,3 - 0,08) \cdot 1400 = 1,032 \times 10^8 \text{ Дж/м}^3$$

Зависимость теплопроводности и от температуры, подготовленная для экспорта в базу веществ ПК, приведена в таблице 1 и на рисунке 5.

Таблица 1

Давление, Па	Температура, К	Теплопроводность, Вт/(м×К)
101325	218.15	1.57
101325	223.15	1.57
101325	228.15	1.57
101325	233.15	1.57
101325	238.15	1.57
101325	243.15	1.57
101325	248.15	1.57
101325	253.15	1.57
101325	258.15	1.57
101325	263.15	1.57
101325	268.15	1.57
101325	270.15	1.57
101325	270.40	1.56
101325	270.90	1.54
101325	271.40	1.52
101325	271.90	1.5
101325	272.40	1.48
101325	272.90	1.46
101325	273.15	1.45
101325	278.15	1.45
101325	283.15	1.45
101325	288.15	1.45
101325	293.15	1.45
101325	298.15	1.45
101325	303.15	1.45
101325	308.15	1.45
101325	313.15	1.45
101325	318.15	1.45
101325	323.15	1.45
101325	328.15	1.45

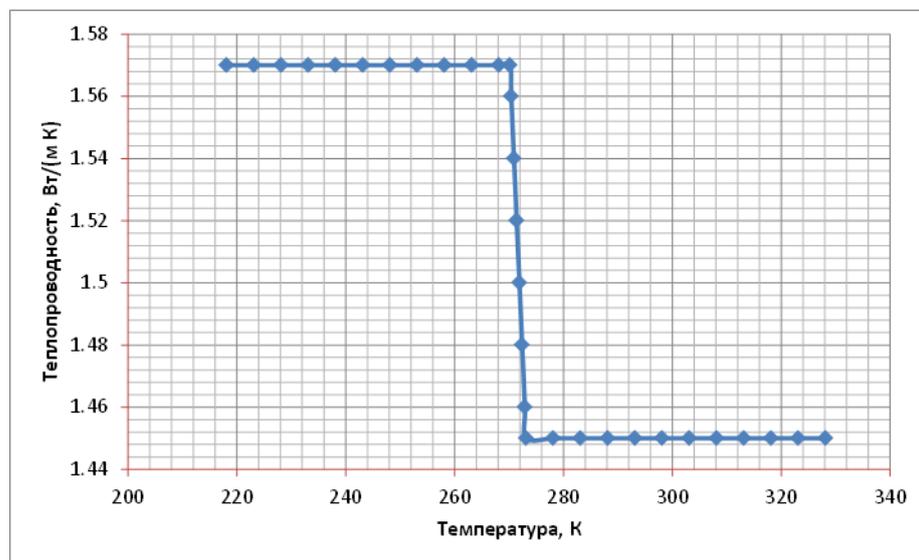


Рисунок 5

Зависимость удельной теплоемкости от температуры приведена на рисунке 6 и в таблице 2. При построении зависимости исходили из того, что площадь пика на графике должна быть равна удельной теплоте фазовых переходов. Такая методика применена в работе. Интервал температур основных фазовых переходов принят от минус 3°С до 0°С.

Удельная теплота фазовых переходов (отнесенная к килограмму грунта) вычислена по влажности грунта и его плотности в естественном состоянии. Ее находим, разделив  $L_v$  на плотность. Площадь пика на рисунке 6 должна быть равна  $(1,032 \times 10^8) / 1820 = 56703$  Дж/кг

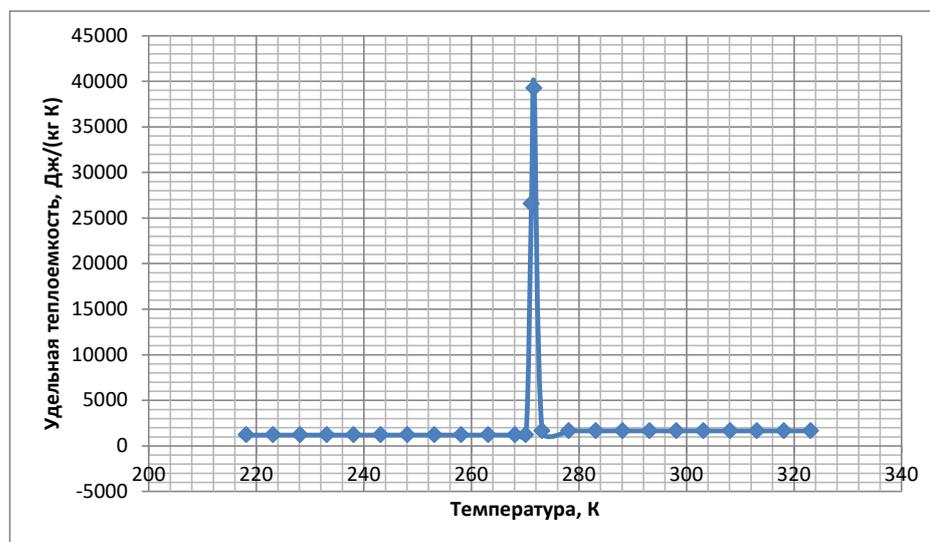


Рисунок 6

Таблица 2

Давление, Па	Температура, К	Удельная теплоемкость, Дж/(кг×К)
101325	218.15	1193
101325	223.15	1193
101325	228.15	1193
101325	233.15	1193
101325	238.15	1193
101325	243.15	1193
101325	248.15	1193
101325	253.15	1193
101325	258.15	1193
101325	263.15	1193
101325	268.15	1193
101325	270.15	1193
101325	271.15	26547
101325	271.65	39224
101325	273.15	1652
101325	278.15	1652
101325	283.15	1652
101325	288.15	1652
101325	293.15	1652
101325	298.15	1652
101325	303.15	1652
101325	308.15	1652
101325	313.15	1652
101325	318.15	1652
101325	323.15	1652
101325	328.15	1652

Данные таблиц, а также значение плотности заносим в базу веществ ПК (рис. 7, 8, 9). Таким образом, для суглинка заданы все свойства, необходимые для теплотехнического расчета.

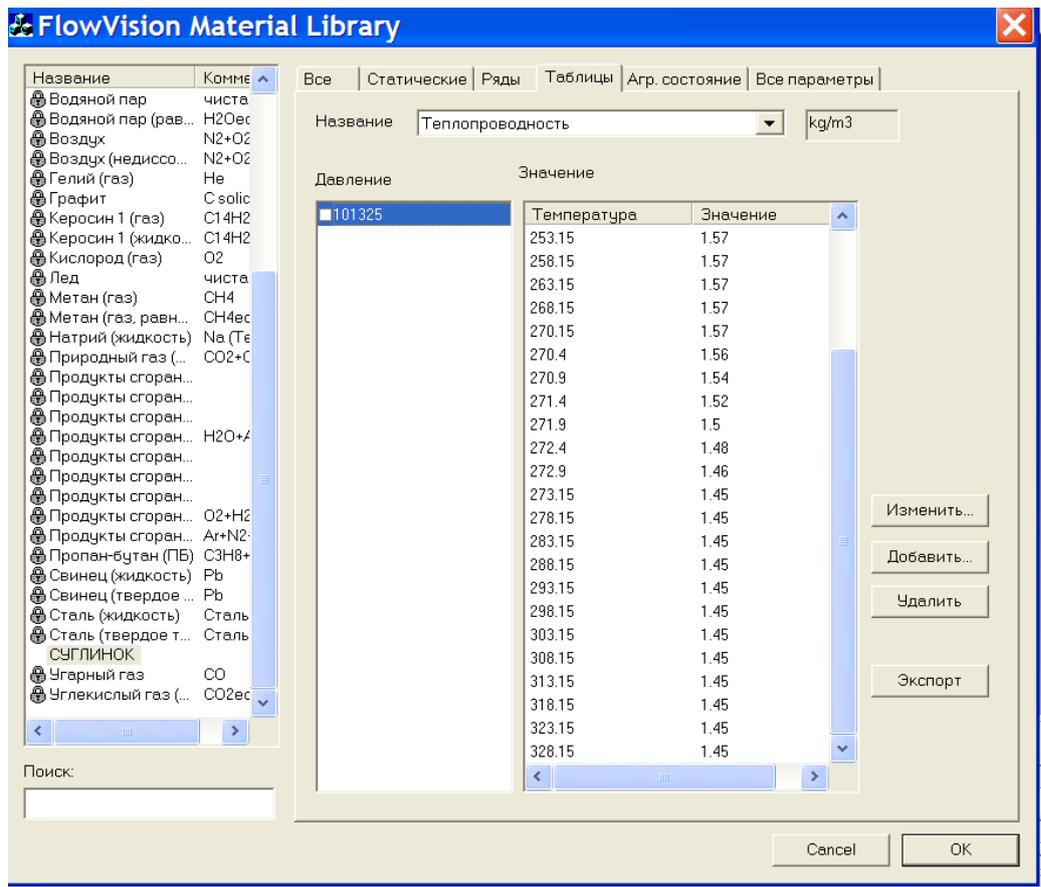


Рисунок 7

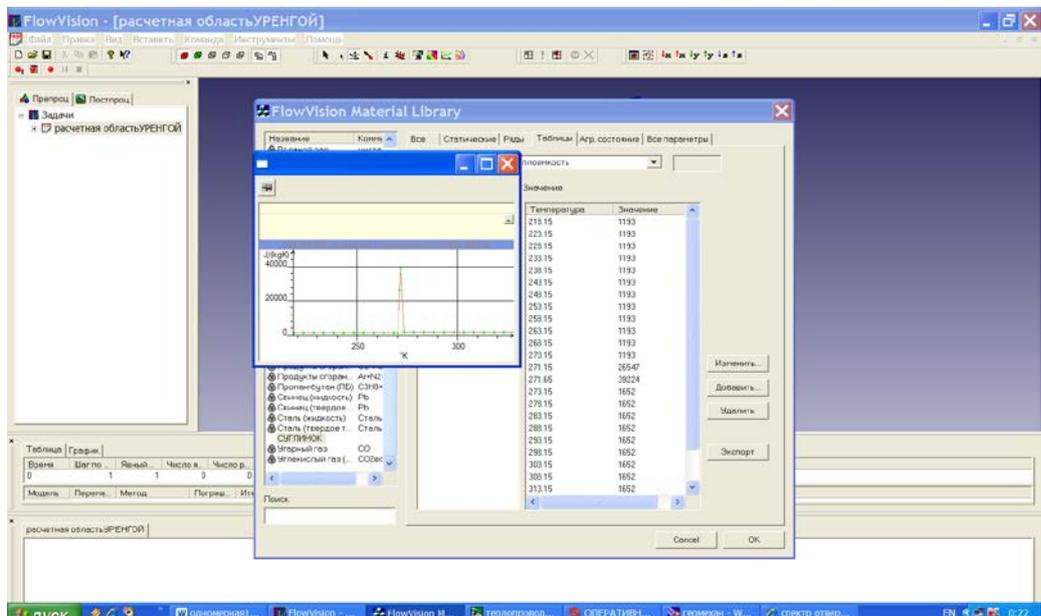


Рисунок 8

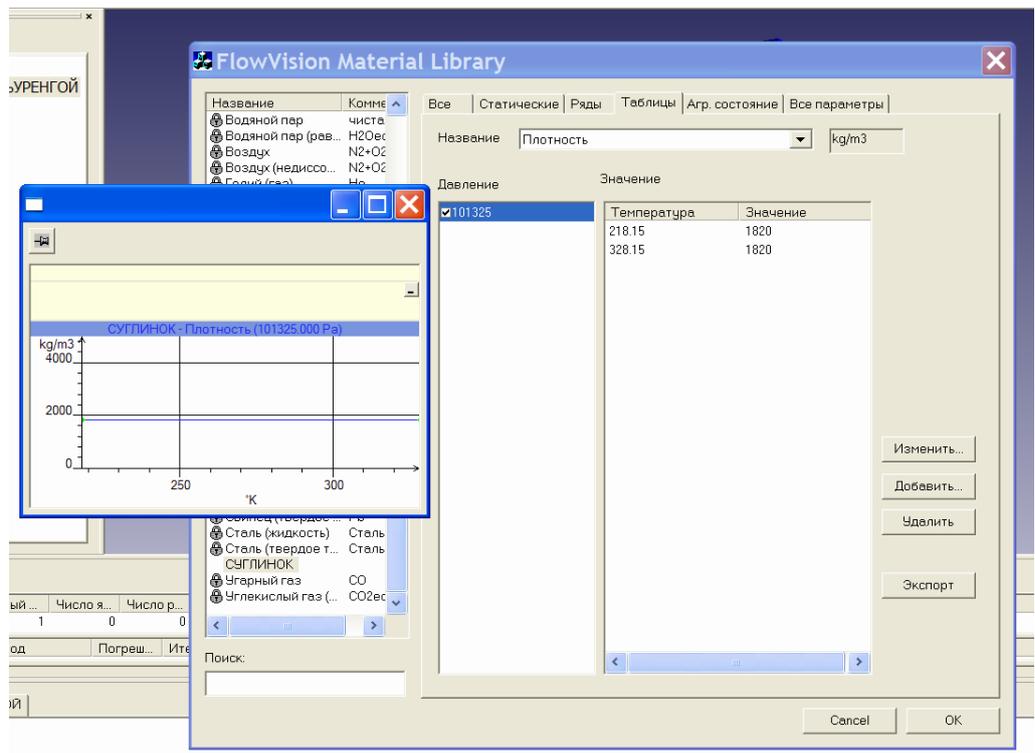


Рисунок 9

## Граничные условия

На все боковые грани задаем одинаковые граничные условия – *нулевой поток*. Это позволяет смоделировать одномерную задачу.

На нижнюю грань задаем условие – *значение температуры на стенке*, указываем постоянную температуру, равную минус 2°C.

На верхней грани необходимо смоделировать периодическое изменение температуры в течение года. Это можно выполнить, задавая на этой грани условие - *значение температуры на стенке* в виде периодической бесконечной функции. Воспользуемся метеоданными о среднемесячной температуре поверхности земли для г. Новый Уренгой (приложение 1).

Среднегодовая температура поверхности за период 1983 ÷ 2005 г. составляет минус 6,32°C, минимальная среднемесячная температура поверхности земли минус 22,89°C наблюдается в январе, максимальная - плюс 15,94 – в июле.

Для решения задачи разложим температуру, заданную строкой 1983 ÷ 2005 таблицы приложения 1, в ряд Фурье, оставляя в нем первые четыре члена. В ПК время задается в секундах.

Выражение для температуры граничного условия найдено при помощи программы Mathcad.

$$-6.292 - 17.588 \cdot \cos\left(2 \pi \cdot \frac{x}{12 \cdot 2628000}\right) - 6.447 \cdot \sin\left(2 \pi \cdot \frac{x}{12 \cdot 2628000}\right) + 1.218 \cdot \cos\left(4 \pi \cdot \frac{x}{12 \cdot 2628000}\right) + 2.006 \cdot \sin\left(4 \pi \cdot \frac{x}{12 \cdot 2628000}\right)$$

График изменения температуры в течение одного года приведен на рисунке 10. Функция может быть продолжена по времени на бесконечность (по оси абсцисс).

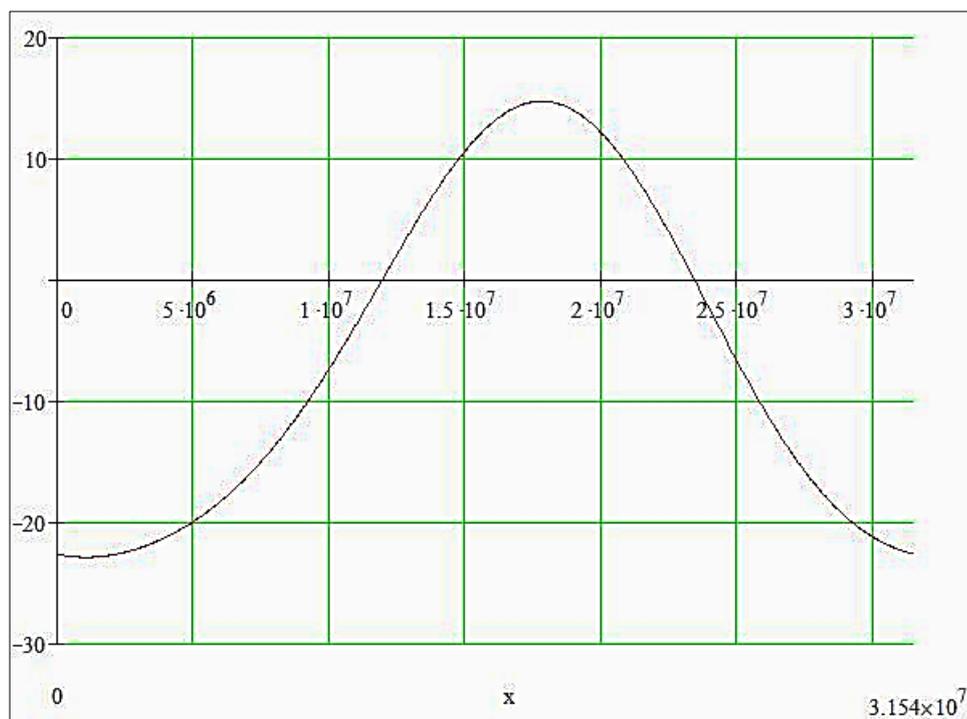


Рис. 10 – Изменение температуры поверхности земли

Характерные значения времени и температуры поверхности земли, найденные по этому графику (в среде Mathcad):

$t_1=0$  с;  $T \approx -22,66$  °С – начало;

$t_2=1100000$  с;  $T \approx -22,91$  °С – середина января, самая низкая температура;

$t_3=11934500$  с;  $T \approx 0$ °С – середина мая, переход на положительные температуры;

$t_4=17800000$  с;  $T \approx 15$ °С – середина июля, самая высокая температура;

$t_5=23404393$  с;  $T \approx 0$ °С – начало октября, переход на отрицательные температуры;

теплый период составляет 3186 ч ( $\approx 133$  суток); холодный период составляет 5574 ч (232 суток).

Чтобы получить характерную дату в любом следующем году, можно воспользоваться формулой

$$t = n \times 31536000 + t_i ,$$

где  $n$  - число полных лет,  $t_i$  – характерное время, числовой коэффициент – количество секунд в году.

Задание граничного условия на *верхней грани* приведено на рисунке 11.

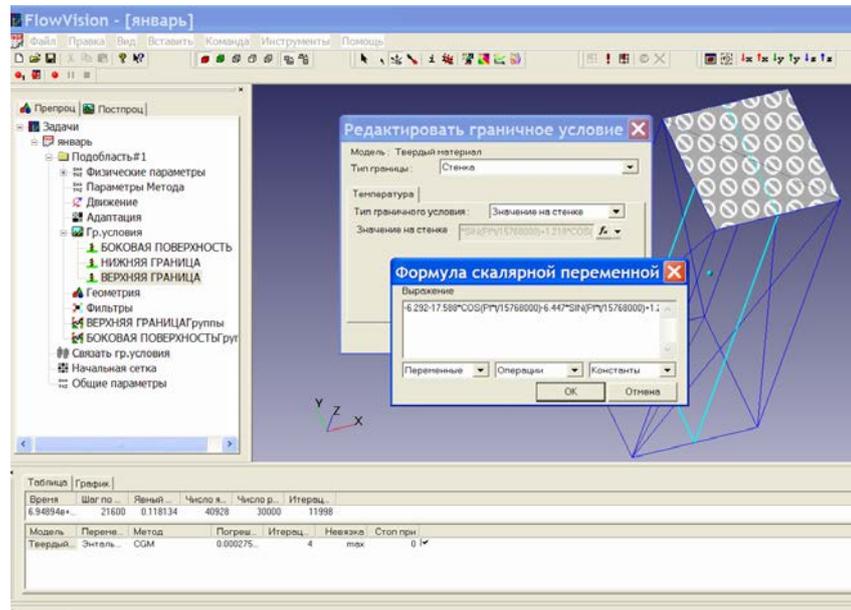


Рисунок 11

### Начальная сетка

Для решения задачи используем равномерную сетку, исходя из следующих соображений. Поскольку решается одномерная задача, дробление области выполняем только по глубине, приняв количество шагов по осям  $Y$  и  $X$  равным 10 (можно 1), а по  $Z$  принимаем 300 равномерных шагов. Таким образом, шаг по глубине составляет 10 см, а по горизонтальным осям – 1 метр.

Задание сетки показано на рисунке 12.

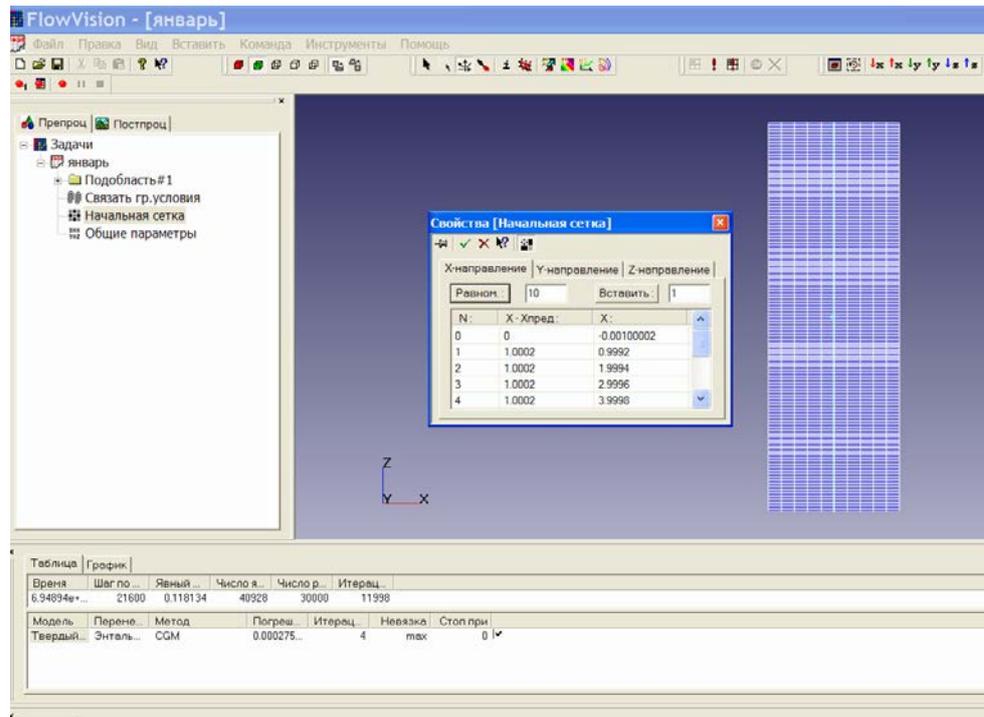


Рисунок 12

### Общие параметры

Для решения задачи используем фиксированный шаг по времени, которое задается в секундах задачи (рис. 13). В данном случае одна секунда задачи равна одной секунде реального процесса. Фиксированный шаг принимаем равным 21600 с, что составляет 6 часов.

Чтобы проанализировать состояние системы на определенный момент времени, можно задать конечное время задачи, по которому произойдет автоматическая остановка расчета. Показанное на рисунке 14 конечное время 694892000 с соответствует началу января 23-го года.

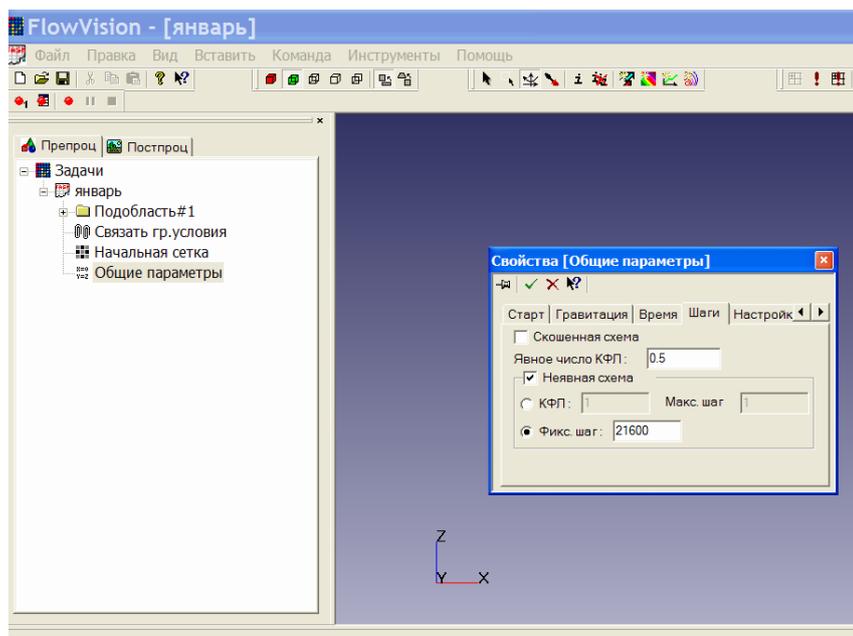


Рисунок 13

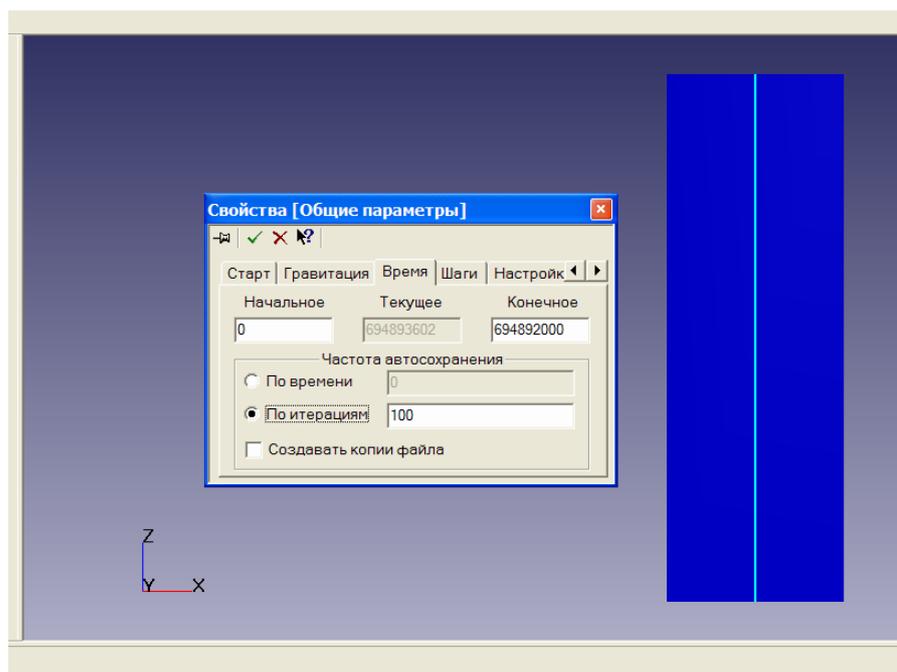


Рисунок 14

## Выполнение расчета

Расчет выполняется от нулевого отсчета по времени и до автоматической остановки по конечному времени. При этом имеется возможность визуального наблюдения процесса сходимости (рис. 15) решения. На графике показано

изменение во времени энтальпии системы, которая в данный момент расчетного времени меняется плавно и регулярно.

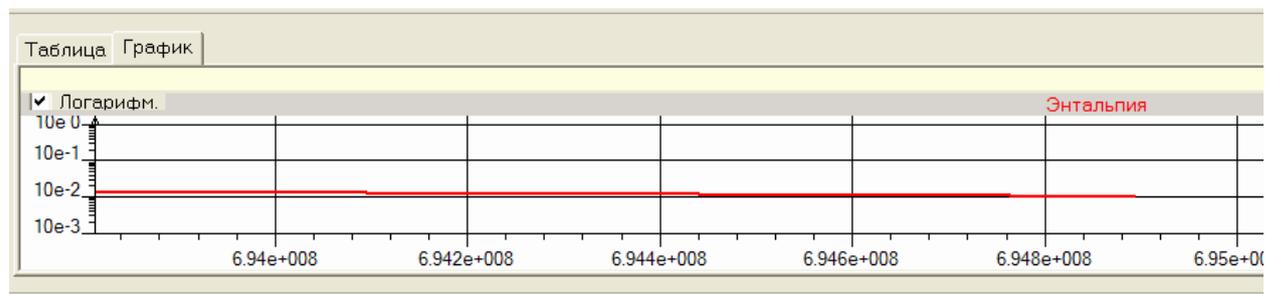


Рисунок 15

### Результаты расчета

Далее приведены наиболее важные результаты выполненных расчетов. Температурные поля представлены в виде заливки и графиков (рис.16 -19).

Наиболее низкая температура на поверхности грунта наблюдается в январе (рис. 16). Наиболее высокая температура на поверхности и в пределах деятельного слоя – в июле (рис. 19).

Наибольшая глубина оттаивания грунта наблюдается в конце сентября (рис. 18). Глубина деятельного слоя, определенная по компьютерной модели, составила около 2,5 метров, что согласуется с величиной 2,1 метра, полученной в результате «ручного» расчета.

Сводный график распределения температуры по месяцам представлен на рисунке 20.

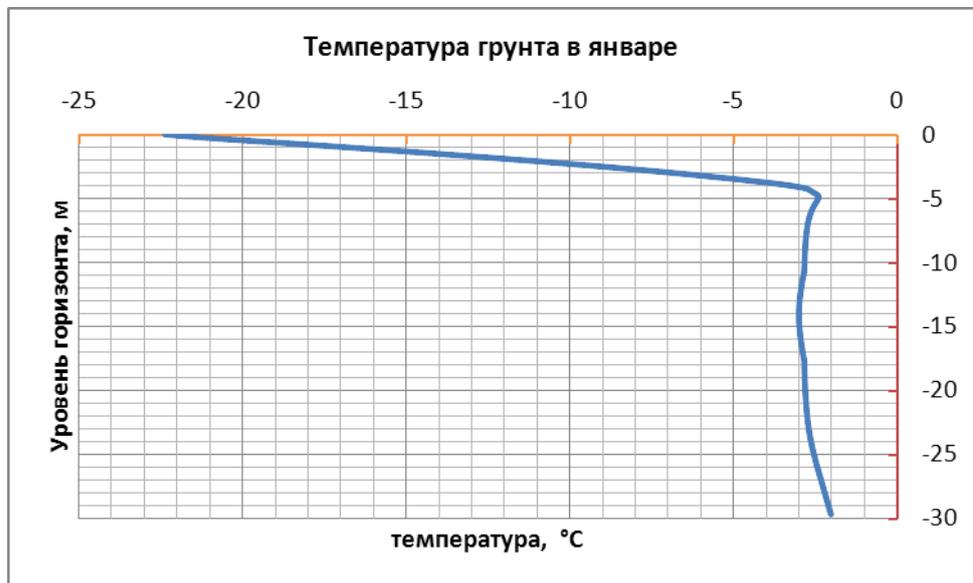
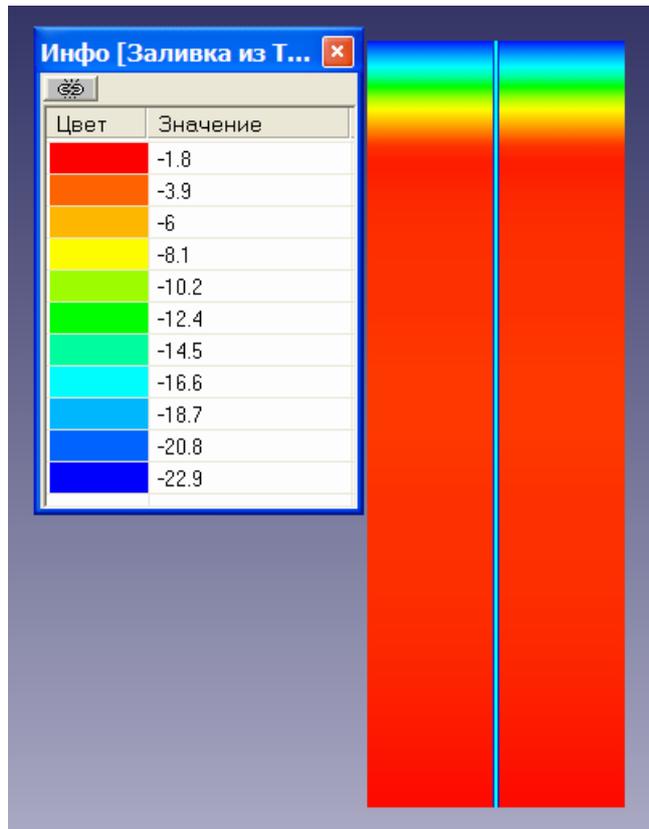


Рисунок 16

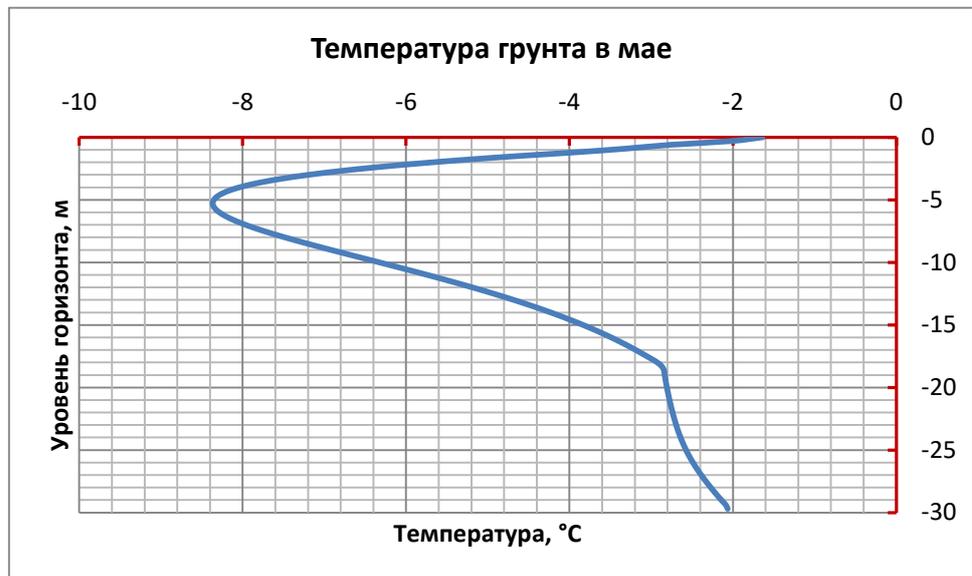
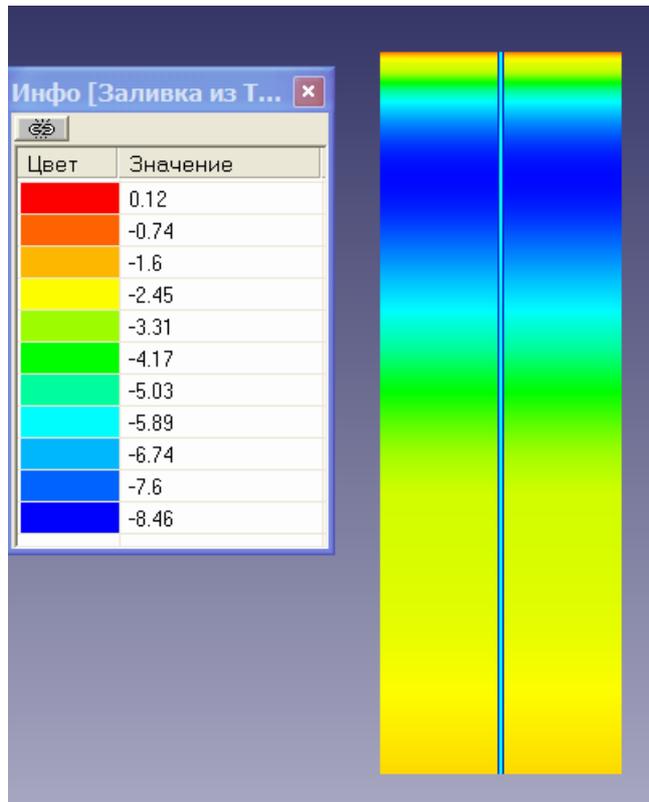


Рисунок 17

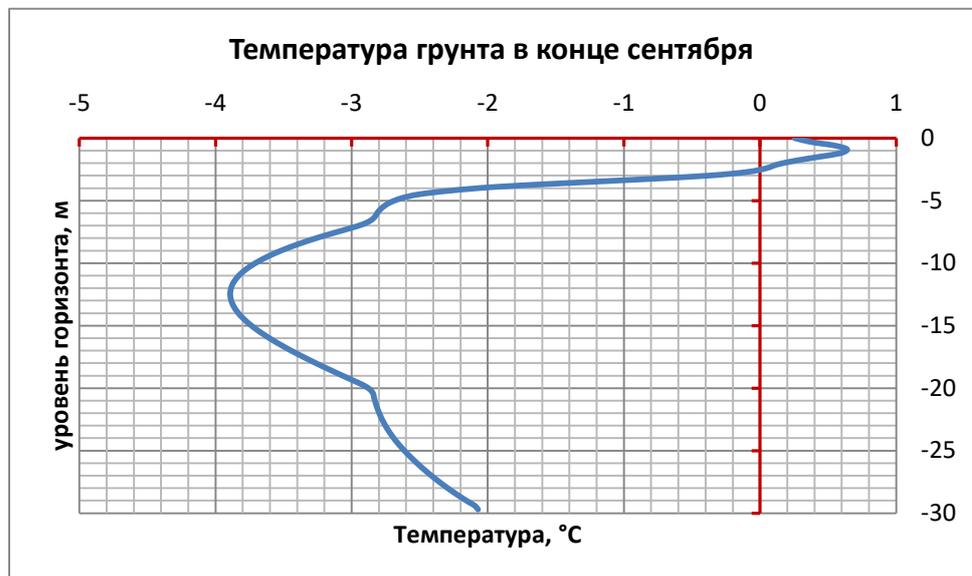
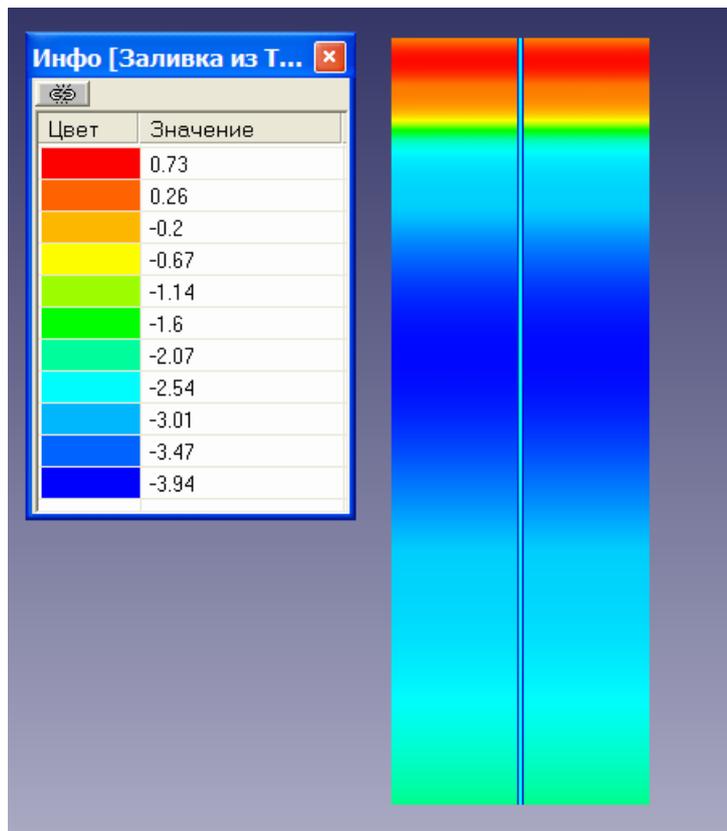


Рисунок 18

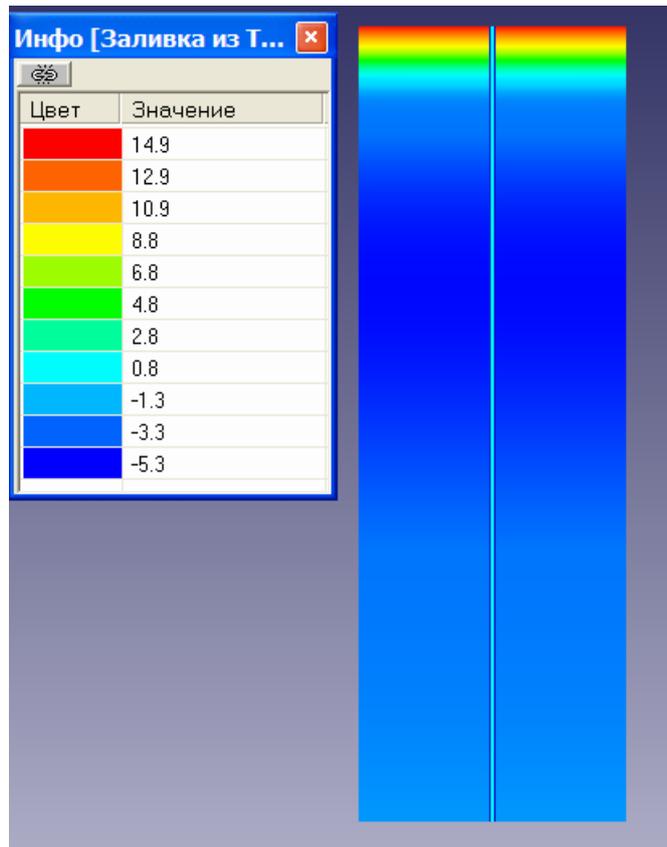


Рисунок 19

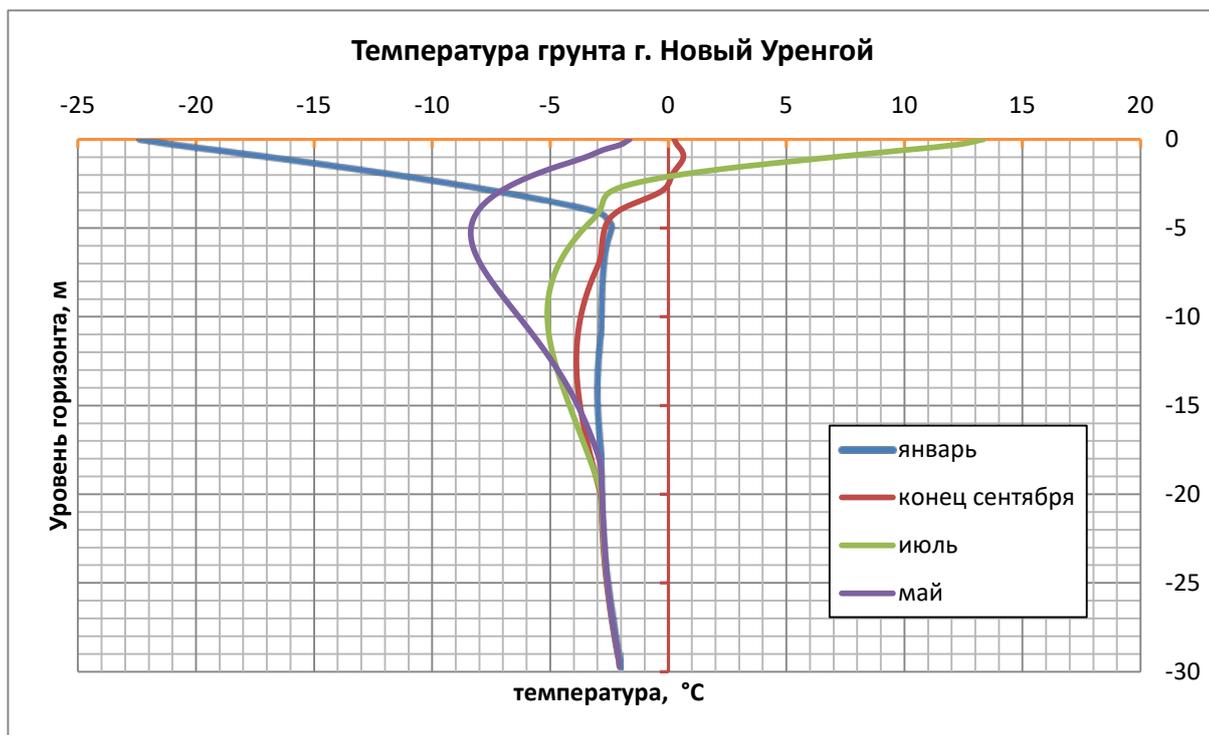


Рисунок 20

По этому графику видно, что начиная с глубины приблизительно 20 метров сезонные колебания температуры практически не происходят. Эту глубину можно считать границей нулевых амплитуд сезонных колебаний температуры.

## **Заключение**

Для применения материала необходимо использование следующих программных комплексов – некоммерческих учебных или демонстрационных версий: AutoCAD, FlowVision, MathCAD, Microsoft Excel.

**Среднемесячная температура поверхности земли (°С) г. Новый Уренгой**

Год	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	За год
1983 г.	16.28	18.01	14.08	12.10	5.56	0.32	6.59	7.79	5.55	-3.14	11.67	17.41	4.42
1984 г.	14.84	16.70	13.85	16.42	3.63	1.08	7.41	7.46	6.69	-5.58	23.82	20.12	5.46
1985 г.	24.39	26.75	15.06	9.78	3.41	1.82	4.87	7.48	6.67	-2.70	17.36	18.85	6.00
1986 г.	19.64	21.23	14.50	10.41	3.07	0.48	6.16	7.02	1.94	-3.00	9.47	26.40	5.76
1987 г.	27.05	19.97	16.90	12.23	1.84	0.07	8.27	7.37	5.68	-3.22	16.94	17.17	5.90
1988 г.	20.18	24.88	13.39	14.52	2.20	0.54	5.76	7.15	5.47	-3.71	13.38	15.19	5.38
1989 г.	22.56	16.70	11.55	12.87	0.77	0.51	7.19	7.13	3.54	-4.79	12.38	19.79	4.68
1990 г.	24.76	22.61	14.20	6.80	0.90	1.83	1.02	7.68	3.99	-8.25	19.45	20.53	5.64
1991 г.	19.27	23.29	20.24	6.10	0.45	2.60	6.65	7.45	7.95	-4.06	13.95	22.19	5.07
1992 г.	24.01	19.56	14.95	17.23	0.92	0.47	5.38	7.35	1.44	10.32	20.87	17.32	7.47
1993 г.	15.71	17.11	11.44	11.78	5.06	1.26	8.96	7.01	4.17	-7.98	15.00	23.06	5.07

1994 г.	25.34	-	30.69	-	11.31	-	9.81	-	5.65	1.53	1	7.22	1	.77	11	3.26	-4.33	19.35	-	22.96	-	6.98	-	
1995 г.	14.84	-	12.90	-	14.40	-	2.28	-	.42	.05	7	7.30	1	.46	13	3.73	-5.60	17.19	-	23.66	-	3.94	-	
1996 г.	23.76	-	17.44	-	12.25	-	12.47	-	4.63	.39	7	8.12	1	.51	7.	0.27	-4.72	12.66	-	21.29	-	6.29	-	
1997 г.	26.54	-	25.55	-	11.83	-	2.96	-	.17	.08	8	.55	9	.52	9.	7.10	-2.18	20.35	-	27.68	-	6.53	-	
1998 г.	21.58	-	26.73	-	14.12	-	13.67	-	3.15	.20	8	7.30	1	.13	13	-0.19	11.99	-	28.21	-	22.25	-	8.46	-
1999 г.	29.57	-	17.80	-	23.86	-	11.64	-	3.71	.20	4	3.26	1	.75	9.	2.77	-5.76	18.31	-	16.88	-	8.08	-	
2000 г.	28.53	-	20.93	-	13.82	-	8.75	-	1.62	2.40	1	3.24	1	.18	14	2.61	-7.78	24.48	-	31.57	-	7.89	-	
2001 г.	36.34	-	27.65	-	20.47	-	12.50	-	1.75	2.07	1	1.80	1	.18	14	4.01	-9.35	17.95	-	19.50	-	8.52	-	
2002 г.	25.33	-	21.61	-	16.56	-	11.63	-	2.45	1.52	1	3.24	1	.85	9.	0.31	-5.58	17.28	-	28.35	-	7.75	-	
2003 г.	26.92	-	25.00	-	19.47	-	10.70	-	.22	4.31	1	3.62	1	.68	15	4.61	-3.86	22.73	-	18.85	-	6.47	-	
2004 г.	20.85	-	21.74	-	17.57	-	13.98	-	2.36	2.90	1	6.39	1	.90	7.	3.03	-6.95	13.46	-	25.72	-	6.83	-	
2005 г.	18.17	-	23.15	-	17.80	-	11.84	-	0.16	0.88	1	7.27	1	.08	11	6.98	-2.79	10.74	-	19.69	-	4.73	-	
2005	1983 -	-	22.89	-	21.65	-	15.38	-	10.98	2.07	.89	9	5.94	1	.73	11	3.98	-5.55	17.26	-	21.58	-	6.32	-
разн.	Мин.	-	13.45	-	-9.04	-	8.48	-	6.26	3.58	5.69	-	6.39	-	-	-4.17	-6.44	10.95	-	-9.99	-	7.39	-	
разн.	Макс.	8.0	4	8.75	4	.06	8.7	0	.24	.41	4	.08	5	94	3.	3.97	3.37	9	7.7	6.40	5	.81	5	

Алексей Алексеевич Денисенко

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В МЕРЗЛОМ ГРУНТЕ В ГОДОВОМ ПЕРИОДЕ

Методическим разработкой по дисциплине «Проектирование зданий для экстремальных условий» для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство» всех форм обучения

Электронные данные. Кафедра СиМ Рубцовского индустриального института  
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6