

# ПРОГНОЗ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА

*Исполнитель: студент горного факультета, А.А. Волошина*

*Научный руководитель: профессор кафедры  
теплотехники и теплоэнергетики, д.т.н. А.Ф.Галкин*  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

## Цель работы

Разработать компьютерную программу на основе численного решения уравнений теплового баланса для прогноза тепловых условий в горных выработках золотодобывающего рудника Севера, эксплуатирующегося с нерегулируемым тепловым режимом.

## Математическая модель

Прогноз теплового режима в горных выработках производится на основе численного решения уравнений теплового баланса [1,2].

Общий вид уравнения для определения температуры на  $i$ -ом участке горной выработки находится по рекуррентной формуле и выглядит так:

$$t_{i+1} = T_{ej} + (t_i - T_{ej})e^{Al}, \quad (1)$$

где  $t_{i+1}$  - температура воздуха в выработке в исследуемом месяце,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{ej}$  - естественная температура стенки прошлого месяца,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_i$  - температура воздуха в выработке, полученная в прошлом месяце,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $l$  - длина выработки, м;

Параметр «А» определяется по формуле

$$A = -\frac{K_{\tau}U}{GC'_p}, \quad (2)$$

где  $C'_p$  - коэффициент теплоемкости пород, Дж/(кг\*К);  $G$  - массовый расход воздуха, определяемый как

$$G = \gamma_B VS, \quad (3)$$

где  $\gamma_B$  - вес воздуха, кг/м<sup>3</sup>; V - скорость воздуха, м/с; S - площадь сечения выработки, м<sup>2</sup>.

Коэффициент нестационарного теплообмена  $K\tau$  находим по формуле

$$K_\tau = \alpha n, \quad (4)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>\*К);

$$\alpha = \left( \frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_{кр}}{\lambda_{кр}} \right)^{-1}, \quad (5)$$

Где  $\delta_{кр}$  - толщина крепи, м;  $\lambda_{кр}$  - коэффициент теплопроводности крепи, Вт/(м\*К);

Отношение  $R = \frac{\delta_{кр}}{\lambda_{кр}}$  - термическое сопротивление, (м<sup>2</sup>\*К)/Вт.  $\alpha_0$  - коэффициент

конвективной теплоотдачи:

$$\alpha_0 = 2\varepsilon(\gamma_B V)^{0,8} \left( \frac{U}{S} \right)^{0,2}, \quad (6)$$

где U - периметр выработки, м;  $\varepsilon$  - коэффициент шероховатости стенок выработки.

Параметр «n», входящий в формулу (4), определяется из следующей зависимости [2,3].

$$n = 1 - \frac{Bi}{Bi + 0,375} \cdot \left( \frac{Z}{Z + 0,85} \right), \quad (7)$$

где

$$Z = (Bi + 0,375) \sqrt{F_0}. \quad (8)$$

Где  $Bi = \frac{\alpha R_0}{\lambda_{нор}}$ ,  $\lambda_{нор}$  - коэффициент теплопроводности пород, Вт/(м\*К);  $R_0$  -

приведенный или эквивалентный радиус горной выработки, м. равный  $R_0 = 0,564\sqrt{S}$

$F_0 = \frac{a\tau}{R_0^2}$ , где  $\tau$  продолжительность месяца, час.,  $a$  - коэффициент

температуропроводности воздуха,  $a_0 \cong 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{час}$ ;

### Алгоритм расчета

1). На первом шаге определяем температуру воздуха в конце выработки после проветривания в течение первого месяца эксплуатации рудника с использованием формул (1)-(8)

$$t_1 = T_{e0} + (t_0 - T_{e0})e^{At}, \quad (9)$$

где  $t_0$  - температура подаваемого в выработку воздуха в первый месяц эксплуатации рудника,  $^{\circ}\text{C}$ .

2). Далее, определяем естественную температуру стенки выработки для второго месяца

$$\text{Общая формула: } T_{e_{j+1}} = \left[ \left( \frac{t_i + t_{i+1}}{2} \right) + T_{e_j} \right] / 2, \quad (10)$$

где  $t_i$  и  $t_{i+1}$  - температуры подаваемого воздуха соответственно в предыдущий и рассматриваемый месяц,  $^{\circ}\text{C}$ .

$$\text{Частная формула: } T_{e1} = \left[ \left( \frac{t_0 + t_1}{2} \right) + T_{e0} \right] / 2$$

1) Шаги 1 и 2 повторяем для всех последующих месяцев проветривания до выхода значений температуры в конце рассматриваемого участка выработки температуры на квазистационарный режим.

## Описание программы

Программа написана на языке программирования «С++» в редакторе «QtCreator».

**Назначение.** Программа предназначена для расчета температуры воздуха в горных выработках на основе решения уравнений теплового баланса. Преимущественно программа может быть использована для прогноза тепловых условий в горных выработках золотодобывающих рудников Севера, эксплуатирующихся с нерегулируемым (естественным) тепловым режимом.

**Внешний вид.** Программа представляет собой графический интерфейс, включающий в себя диалоговые окна для введения требуемых параметров выработки, физико-механических свойств горных пород и требуемых аэродинамических характеристик рудничного воздуха. Клавиш для расчета температур воздуха в выработке по месяцам, в зависимости от месяца начала проветривания конкретной выработки, а также диалогового окна, где выдаются полученные характеристики вентиляционного воздуха в выработке.

Рядом с диалоговыми окнами написаны размерности, в которых следует вводить те или иные параметры, необходимые для численного решения уравнений теплового баланса.

Все численные данные, представленные в виде десятичной дроби, необходимо вводить через точку, тем самым разделяя целую и дробную части числа.

При введении индекса месяца, с которого начинается проветривание выработки, следует учитывать, что за первый месяц – «январь» в данной программе принят индекс «0». Таким образом, интервал месяцев для проветривания составляет от индекса под номером «0», что как уже было сказано, соответствует месяцу - «январь» до индекса под номером «11», что соответствует месяцу – «декабрь».

Анализ выходных параметров подвергается обработке со стороны оператора. Для расчета температур для первого года следует нажать на кнопку «Расчет». Для того, чтобы получить результаты для последующих лет эксплуатации данной выработки, следует нажать кнопку «+ год». Далее анализируя полученные данные, следует отследить именно тот год, в котором полученные данные будут полностью идентичны данным предыдущего года. Именно этот год и следует считать годом выравнивания теплового режима в данной горной выработке при определенных исходных данных.

Полученные данные имеют точность вплоть до четвертого знака после запятой.

### Пример расчета.

Для тестового расчета были выбраны следующие характерные исходные данные:

$$S = 13,4 \text{ м}^2; U = 15 \text{ м}; L = 164 \text{ м}; \varepsilon = 2; C'_p = 1200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°K}}; \lambda_{\text{нор}} = 2,26 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°K}};$$

$$\delta_{\text{кр}} = 0 \text{ м}; \lambda_{\text{кр}} = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°K}}; \gamma_B = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; V = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}; T_{e0} = -4 \text{ °C};$$

t <sub>возд.</sub>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	-33,6	-31,3	-25	-13,7	-1,1	8,2	12	9,3	1,8	-12,6	-25,2	-32

Далее в окошко с индексом « $t_0$ » вводится месяц, с начала которого в выработку подается воздух определенной температуры. Месяцы вводятся начиная с номера «0», что соответствует первому в календарном году месяцу «январю», и заканчиваются номером «11», что соответствует последнему в календарном году месяцу «декабрю».

### Результаты расчета.

Ниже приведены скриншоты результатов расчетов по исследованию формирования теплового режима в выработке, в зависимости от месяца начала эксплуатации рудника.

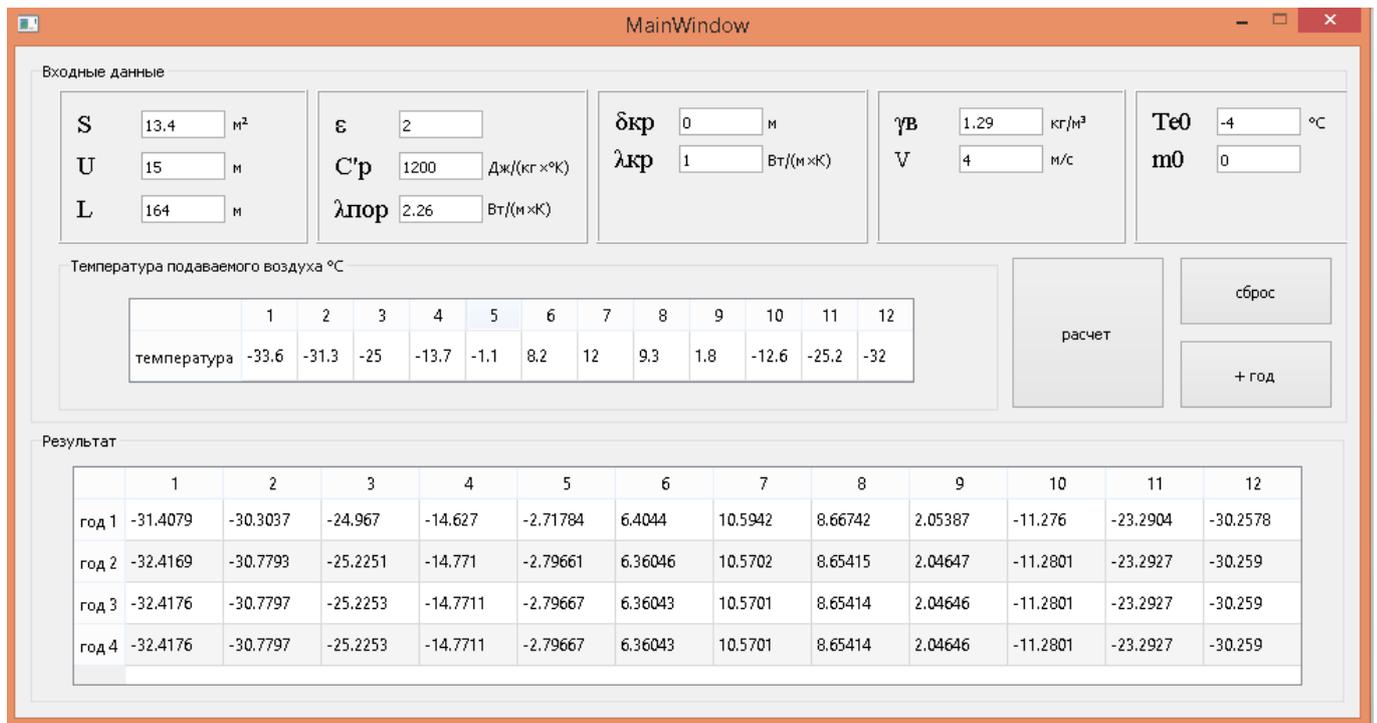


Рис.1 Проветривание выработки, начиная с января месяца

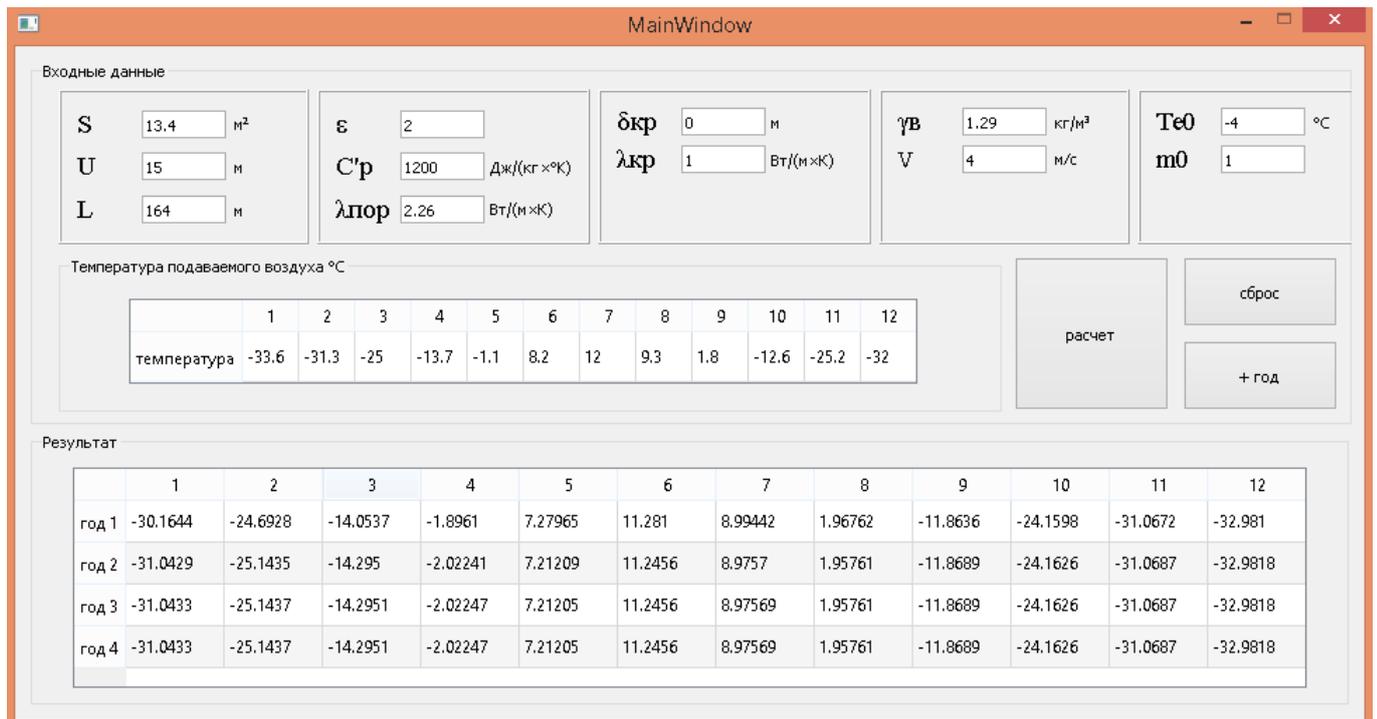


Рис.2 Проветривание выработки, начиная с февраля месяца

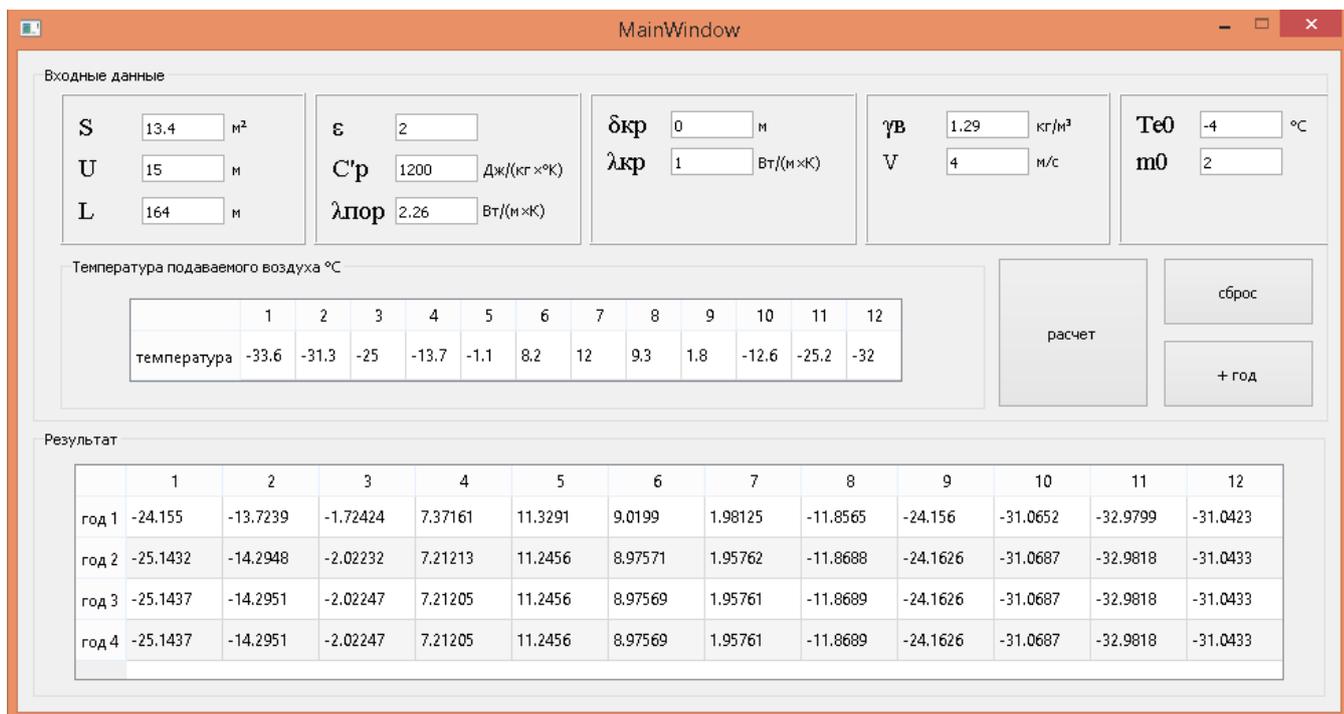


Рис.3 Проветривание выработки, начиная с марта месяца

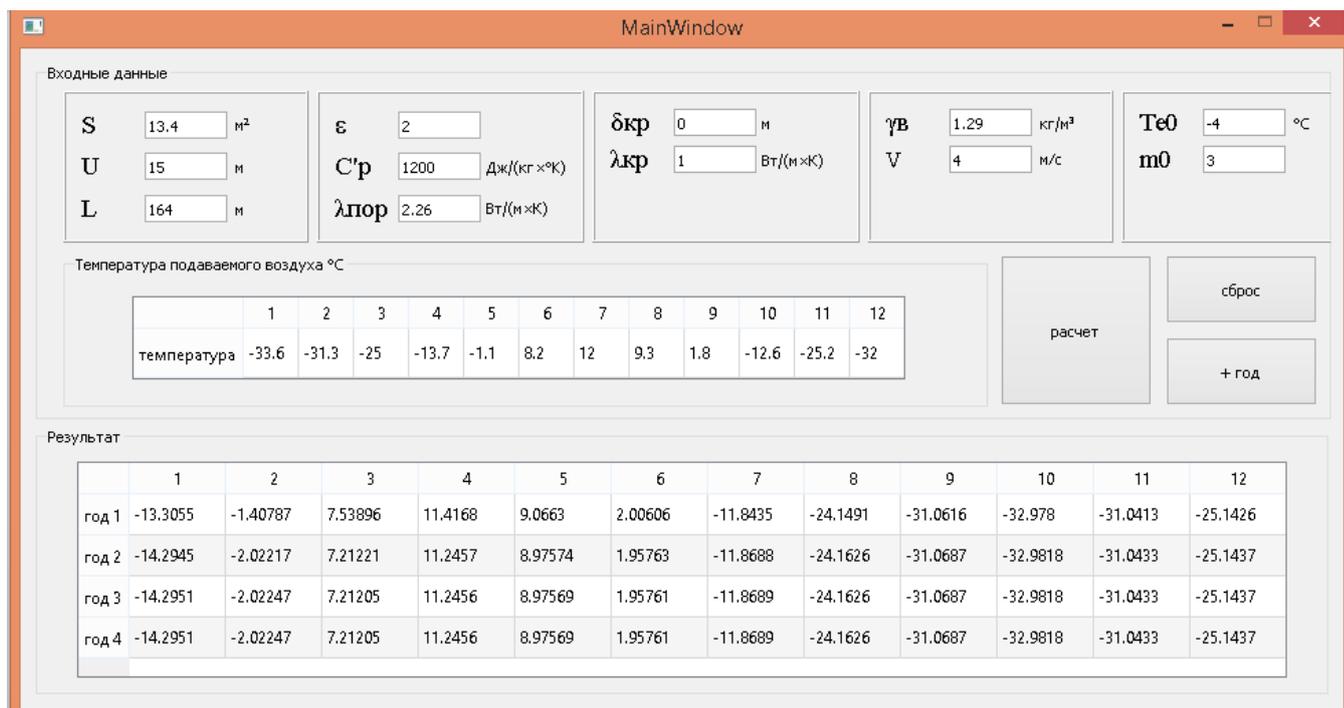


Рис.4 Проветривание выработки, начиная с апреля месяца

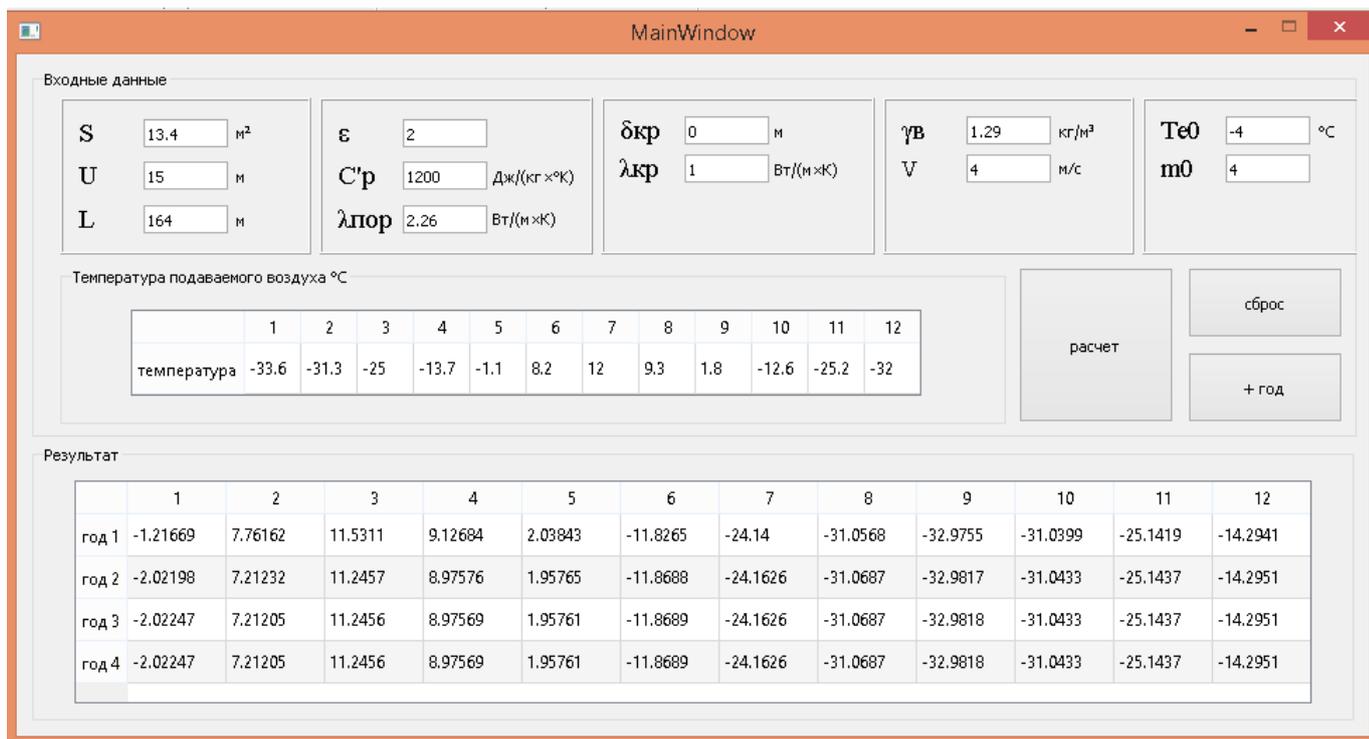


Рис.5 Проветривание выработки, начиная с мая месяца

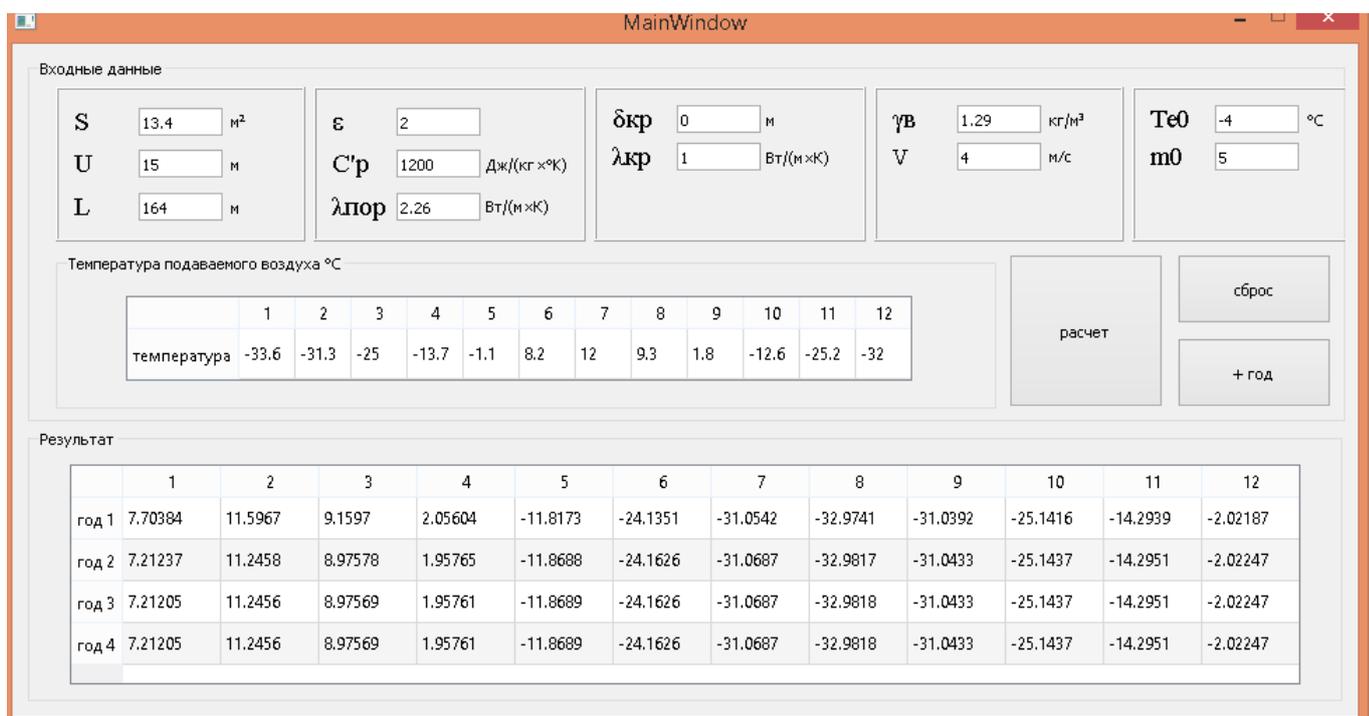


Рис.6 Проветривание выработки, начиная с июня месяца

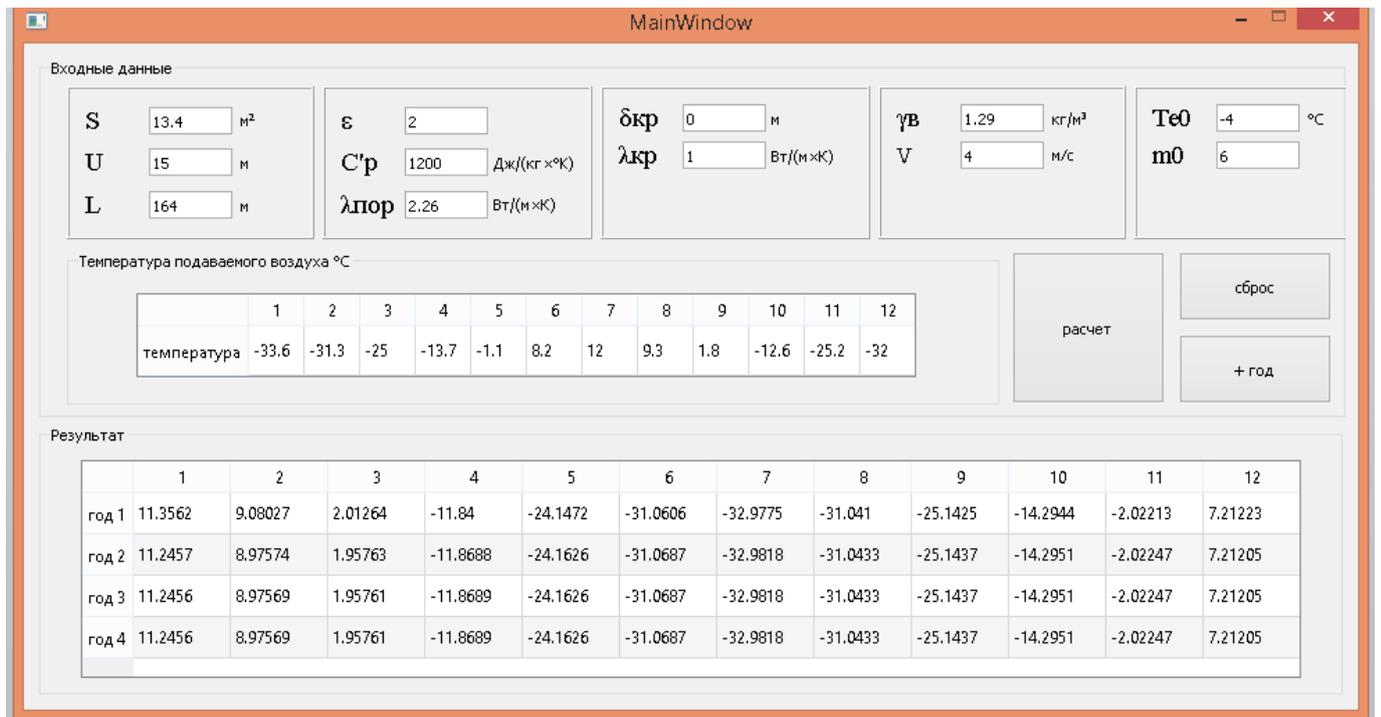
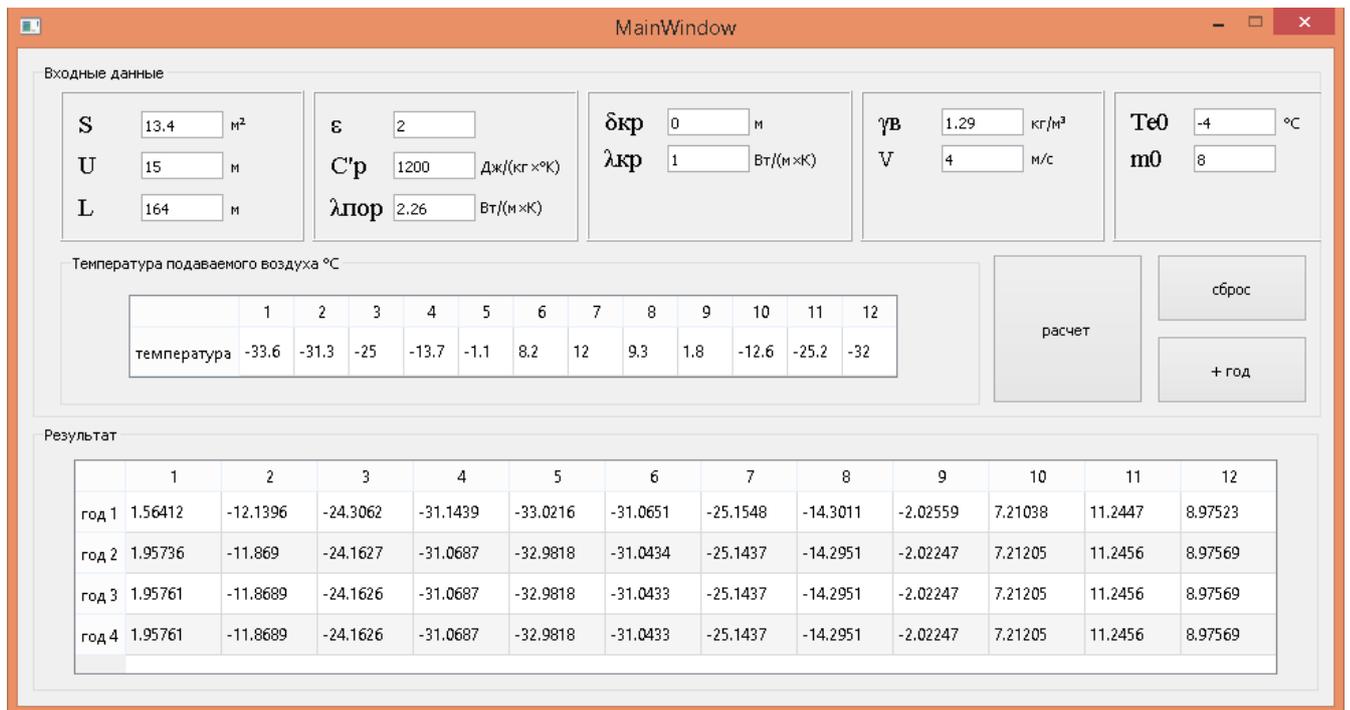


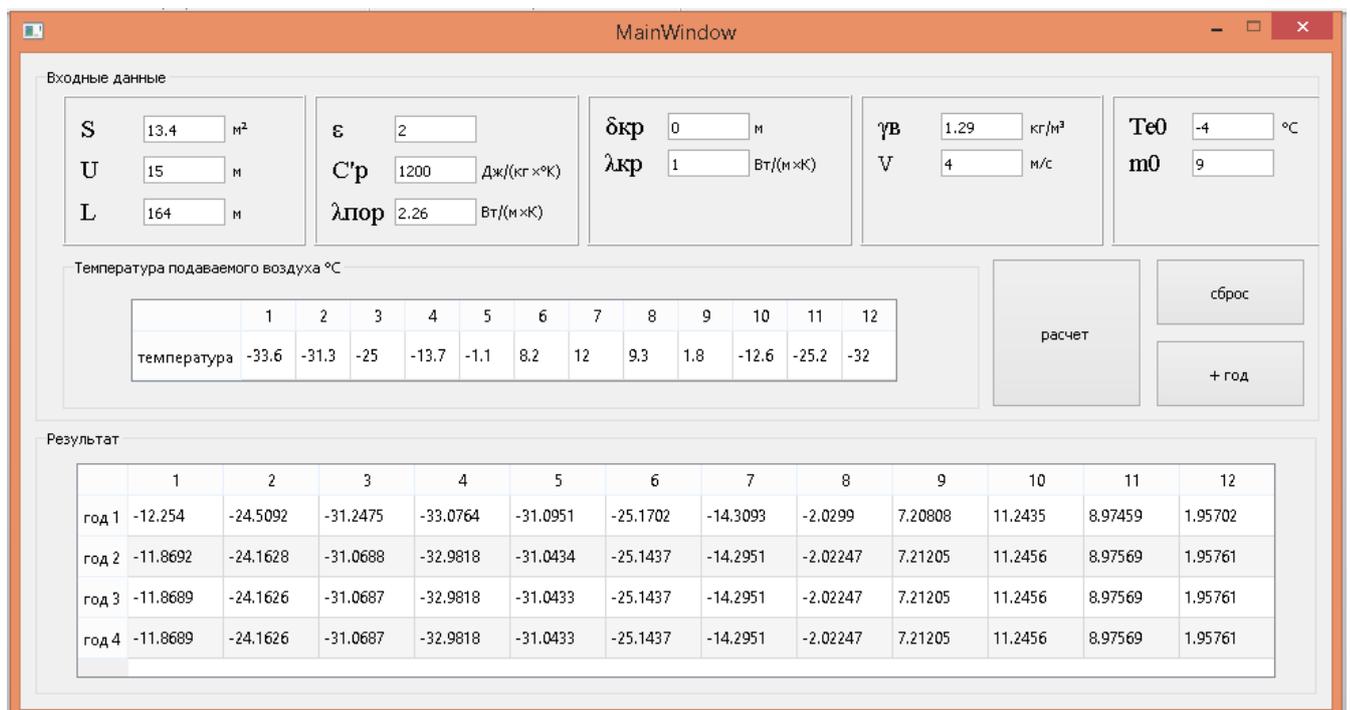
Рис. 7 Проветривание выработки, начиная с июля месяца



Рис. 8 Проветривание выработки, начиная с августа месяца



**Рис.9** Проветривание выработки, начиная с сентября месяца



**Рис.10** Проветривание выработки, начиная с октября месяца

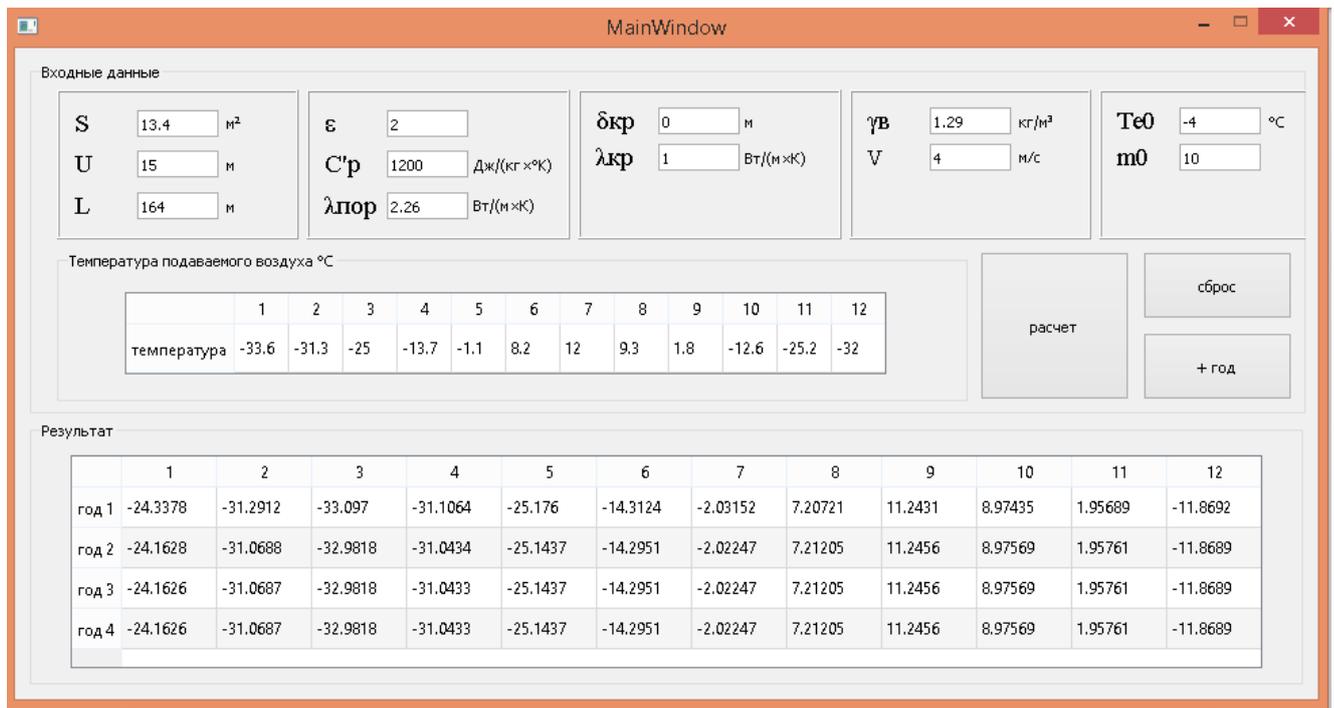


Рис.11 Проветривание выработки, начиная с ноября месяца

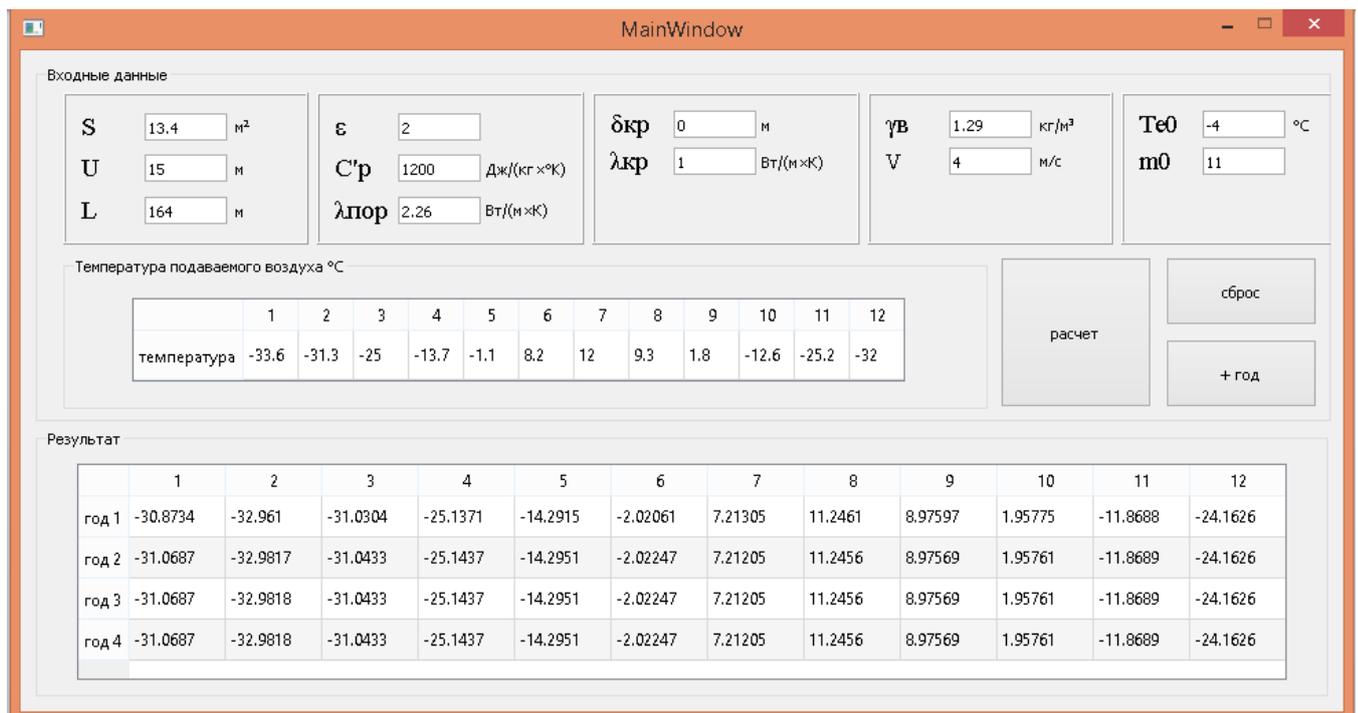


Рис.12 Проветривание выработки, начиная с декабря месяца

## Выводы

Анализируя полученные данные можно сделать вывод о том, что тепловой режим в горной выработке стабилизируется к четвертому году с начала проветривания.

Следует отметить, что если эксплуатация рудника (проветривание) начинается с третьей декады года, то температура воздуха в конце выработки в зимние месяцы соответствует, примерно, температуре подаваемого воздуха.

Следует учесть, что при данном тестовом расчете теплового режима в выработке, естественная температура стенки выработки не изменялась, и была взята как константа, поэтому значения температур по месяцам не изменяются в значительной степени от момента начала проветривания выработки.

В реальных же условиях естественная температура стенки для каждого месяца индивидуальна, поэтому еще одним фактором оптимизации теплового режима в горных выработках, будет являться месяц начала проветривания выработок.

В дальнейшей версии программы этот факт необходимо учитывать.

### **Список использованных источников**

1. Ю.Д. Дядькин. Основы горной теплофизики. М.: Недра. 1968. 256с.
2. А.Ф.Галкин. Тепловой режим подземных сооружений Севера. Новосибирск: ВО Наука, 2000. 304с.