

ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОАНЕМОМЕТРОВ

В.А.Гайский, П.В.Гайский, В.В.Гайский

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Дано краткое описание программной модели термоанемометров, содержащих каналы измерения температуры с пассивными и подогреваемыми датчиками. Численными примерами проиллюстрированы возможности модели.

Известны различные способы измерения температуры и скорости потока с использованием пассивных и подогреваемых датчиков температуры [1,2,3]. Однако отсутствуют методики расчета и выбора рациональных способов технической реализации измерителей для конкретных применений.

Решению этих задач может способствовать программная модель, созданная в отделе автоматизации океанографических исследований в МГИ НАНУ и представленная ниже.

Обобщенная блок-схема термоанемометра представлена на рис.1. На вход измерителя поступают сигналы температуры среды $\theta_c(t)$ и скорости потока $v(t)$. На выходе измеритель выдает в дискретные моменты времени τ измеренные и вычисленные значения температуры $\theta_c^*(\tau)$ и скорости потока $v_c^*(\tau)$, которые при $\tau = t$ отличаются от входных из-за различного рода погрешностей. Желательно сделать эти погрешности минимальными.

Обобщенная структурно-функциональная схема термоанемометра представлена на рис.2. В состав измерителя входят два датчика температуры с конструктивными параметрами (массой m , удельной теплоемкостью c , площадью теплообмена со средой S и мощностью нагрева P), групповой аналого-цифровой преобразователь (АЦП), два цифро-аналоговых преобразователя (ЦАП) для задания тока нагрева и вычислительное устройство (ВУ), роль которого может играть микропроцессор или персональная

ЭВМ. Коэффициент теплообмена датчика со средой $\alpha_i(t)$ зависит от параметров среды (которые принимаем общими для обоих датчиков) и конструктивных параметров датчиков (которые могут быть различными). Поэтому в схему введены два преобразователя скорости потока в коэффициенты теплообмена первого и второго датчиков. Сигналы на выходах датчиков свидетельствуют об их текущей температуре $\theta_1(t)$ и $\theta_2(t)$. На выходе термоанемометра имеем информацию о мгновенных значениях температуры среды $\theta_c^*(\tau)$ и скорости потока $v_c^*(\tau)$ или их осредненных значениях $\bar{\theta}_c^*(\tau)$ и $\bar{v}_c^*(\tau)$.

Датчики считаются сосредоточенными, соответствующими по каналу температуры при постоянной скорости обтекания инерционными звеньями 1-го порядка. Для них используются модели [1,2,3] для пассивного датчика

$$\theta(t) + \frac{mc}{\alpha(t)S} \theta'(t) = \theta_c(t) \quad (1)$$

и для нагреваемого мощностью $P(t)$ датчика

$$\theta(t) + \frac{1}{\alpha(t)S} [mc\theta'(t) - P(t)] = \theta_c(t) \quad (2)$$

Для преобразователей скорости потока $v(t)$ в коэффициент теплообмена $\alpha(t)$ цилиндрического датчика используется эмпирическая формула вида [1,2]

$$\alpha(t) = \alpha_0 + c_0 d^{n-1} v_c^{0,4-n} \lambda_c^{0,6} \gamma_c^{0,4} c_c^{0,4} v^n(t), \quad (3)$$

где α_0 - коэффициент теплообмена, при $v = 0$, табличные коэффициенты c_0 и n принимают значения $c_0 \approx 0,2 \div 0,93$ и $n \approx 0,4 \div 0,6$,

v_c - кинематическая вязкость среды,

λ_c - теплопроводность среды,

γ_c - плотность среды,

c_c - удельная теплоемкость среды,

d - диаметр цилиндрического датчика.

Для конкретной жидкости и конкретного датчика экспериментально, в зависимости от необходимой точности при кусочной по v_i аппроксимации могут быть получены характеристика вида

$$\alpha(t) = \alpha_0 + k_i v_i^n(t) \quad (4)$$

или градуировочная характеристика вида

$$v(\tau) = a_{i0} + a_{i1}\alpha_i(\tau) + a_{i2}\alpha_i^2(\tau) + \dots + a_{im}\alpha_i^m(\tau), \quad (5)$$

где v_i и α_i - скорость потока и коэффициент теплообмена из i -го диапазона, при известных градуировочных коэффициентах a_{ij} ($j = 0, m$).

Мощности $P_1(t)$ и $P_2(t)$ нагрева датчиков задаются в зависимости от используемого способа измерения. Непосредственно измеряются только текущие температуры датчиков $\theta_1(t)$ и $\theta_2(t)$, по последовательности отсчетов которых требуется восстановить температуру среды $\theta_c^*(\tau)$ и коэффициент теплообмена $\alpha^*(\tau)$. Скорость потока $v^*(\tau)$ вычисляется по одной из эмпирических формул (3-5). Например, при измерении по способу 2а [3], с использованием одного подогреваемого датчика с "быстрой" переменной мощностью и фиксацией двух последовательных отсчетов температуры датчика $\theta(1), \theta(2)$ и мощности $P(1)$ и $P(2)$, в предположении неизменности $\theta_c(1) = \theta_c(2)$ и $\alpha(1) \approx \alpha(2)$, искомые величины определяются по формулам:

$$\theta_c^*(1) = \frac{\theta(2)[P(1) - mc\theta'(1)] - \theta(1)[P(2) - mc\theta'(2)]}{P(1) - P(2) + mc[\theta'(2) - \theta'(1)]} \quad (6)$$

$$\alpha^*(1) = \frac{P(1) - P(2) - mc[\theta'(1) - \theta'(2)]}{S[\theta(1) - \theta(2)]} \quad (7)$$

При измерении по методу 1 Г.Пфрима [1] (способ 3б [3]) с использованием двух пассивных датчиков с одинаковыми размерами (d и S), но с разной теплоемкостью ($m_1c_1 \neq m_2c_2$) вычисления производятся по выражениям:

$$\theta_c^*(\tau) = \frac{m_2c_2\theta_1(\tau)\theta_2'(\tau) - m_1c_1\theta_2(\tau)\theta_1'(\tau)}{m_2c_2\theta_2'(\tau) - m_1c_1\theta_1'(\tau)} \quad (8)$$

$$\alpha^*(\tau) = \frac{m_1c_1\theta_1'(\tau) - m_2c_2\theta_2'(\tau)}{S[\theta_2(\tau) - \theta_1(\tau)]} \quad (9)$$

При измерении по методу 2 Г.Пфрима [1] (способ 3в [3]) с использованием двух разных пассивных датчиков с известным

отношением $\alpha_2(t) = \gamma\alpha_1(t)$ вычисления производятся по выражениям:

$$\theta_c^*(\tau) = \frac{m_2c_2S_1\theta_1(\tau)\theta_2'(\tau) - m_1c_1S_2\theta_2(\tau)\theta_1'(\tau)}{m_2c_2S_1\theta_2'(\tau) - m_1c_1S_2\theta_1'(\tau)} \quad (10)$$

$$\alpha_1^*(\tau) = \frac{m_1c_1S_1^{-1}\theta_1'(\tau) - m_2c_2S_2^{-1}\theta_2'(\tau)}{\theta_1(\tau) - \theta_2(\tau)} \quad (11)$$

При измерении по методу 3 Г.Пфрима [1] (способ 4а [3]) с использованием одного пассивного и одного подогреваемого датчика с одинаковыми конструктивными параметрами m, c, S вычисления производятся по выражениям:

$$\theta_c^*(\tau) = \frac{\theta_1(\tau)[\theta_2'(\tau) - \frac{P(t)}{mc}] - \theta_2(\tau)\theta_1'(\tau)}{\theta_2'(\tau) - \frac{P(t)}{mc} - \theta_1'(\tau)} \quad (12)$$

$$\alpha^*(\tau) = \frac{mc[\theta_1'(\tau) - \theta_2'(\tau)] + P(\tau)}{S[\theta_2(\tau) - \theta_1(\tau)]} \quad (13)$$

Пакет программной модели термоанемометра работает в среде MS Windows и имеет многооконный интерфейс, отображающий входные и выходные данные в численно-графическом виде.

Основными функциями пакета в соответствии с постановкой задачи являются:

- ввод значений параметров среды (кинематической вязкости, теплопроводности, плотности и удельной теплоемкости, а также функций температуры среды и скорости обтекания датчика, меняющихся во времени);

- ввод параметров для двух цилиндрических датчиков температуры (диаметр, длина, плотность и удельная теплоемкость материала);

- ввод функции нагрева второго датчика температуры во времени;

- вычисление коэффициента теплообмена и измеряемой температуры по заданным параметрам для обоих датчиков;

- вычисление температуры среды с использованием заданного метода;

- погрешность вычисленной температуры среды на заданном временном интервале (отклонение, дисперсия, среднее квадратическое отклонение);

- вывод результатов в численно-графическом виде на экран дисплея и файлы (значения и ряды данных в текстовый файл *.RES, графики в стандартные графические файлы типа *.BMP и *.WMF).

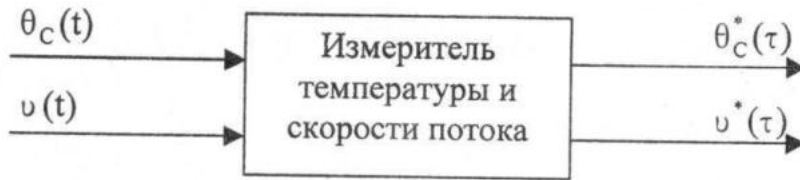


Рис. 1 - Обобщенная блок-схема термоанемометра

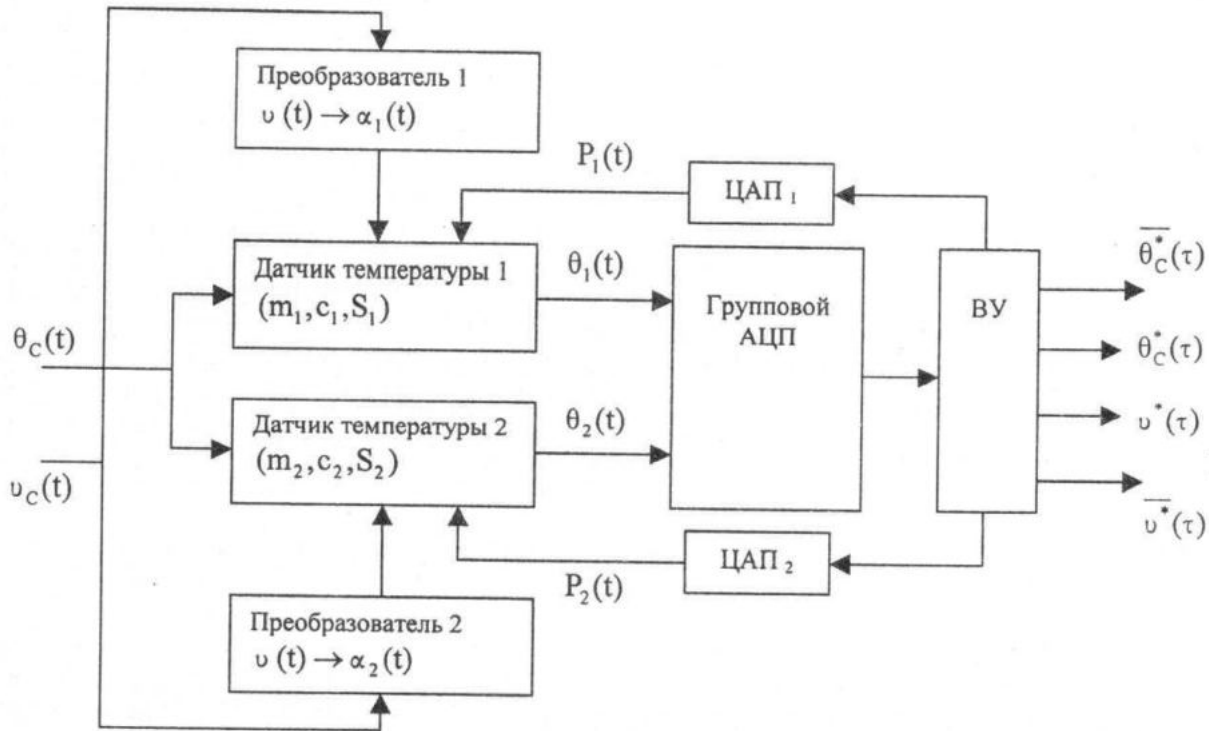


Рис. 2 - Обобщенная структурно-функциональная схема термоанемометра

Модель термоанемометра

Численные параметры | Температура среды (град.) | Скорость потока (м/с) | Нагрев (Вт)

Физические параметры среды		Для морской воды		Табличные коэффициенты	
Кинематическая вязкость	1E-6	$\nu_c \approx 7 \cdot 10^{-7} + 2 \cdot 10^{-8} \frac{m^2}{c}$		$c_s \approx 0,2 + 0,93 \frac{0,5}{0,5}$	
Теплопроводность	0,6	$\lambda_c \approx 0,55 + 0,62 \frac{m}{m \cdot c \cdot K}$		$n \approx 0,4 + 0,6 \frac{0,5}{0,5}$	
Плотность	1000	$\gamma_c \approx 975 + 1025 \frac{kg}{m^3}$		Основные расчетные формулы	
Удельная теплоемкость	4200	$c_c \approx 4180 + 4320 \frac{Дж}{кг \cdot K}$		Козф-т теплоотдачи, Дж/(м ² ·с·К):	
Параметры датчика 1		Параметры датчика 2		$\alpha(t) \approx c_0 \alpha^{n-1} \sqrt{c_c^{0,4} \lambda_c^{0,6} \gamma_c^{0,4} c_c^{0,4} v^n(t)}$	
Диаметр (d), м	0,003	Диаметр (d), м	0,005	Температура датчика $\theta(t)$:	
Длина (h), м	0,05	Длина (h), м	0,07	$\frac{mc}{\alpha(t)S} \theta'(t) + \theta(t) - \theta_c(t) = 0$	
Плотность материала (rho), кг/м ³	8900	Плотность материала (rho), кг/м ³	8900		
Уд. теплоемкость (c), Дж/(кг·К)	400	Уд. теплоемкость (c), Дж/(кг·К)	400		
Дополнительные методы расчета		$\theta_c(t) = \frac{m_2 c_2 S_1 \theta_1(t) \theta_2'(t) - m_1 c_1 S_2 \theta_2(t) \theta_1'(t)}{m_2 c_2 S_1 \theta_2'(t) - m_1 c_1 S_2 \theta_1'(t)}$			
два датчика без подогрева					
нет					
два датчика без подогрева один датчик 1 с подогревом два датчика (второй с подогревом)					
Загрузить установки из файла		Вычислить		Сохранить установки и результаты в файл	

Рис. 3 - Вид основного окна ввода данных

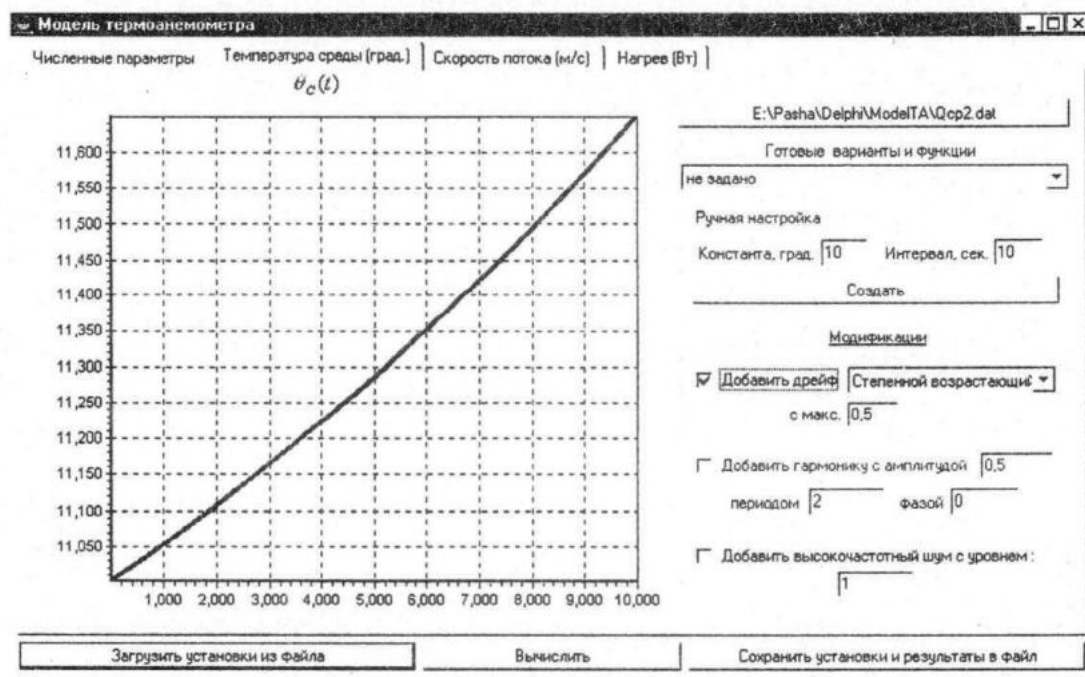


Рис. 4 - Пример ввода функции изменчивости температуры среды

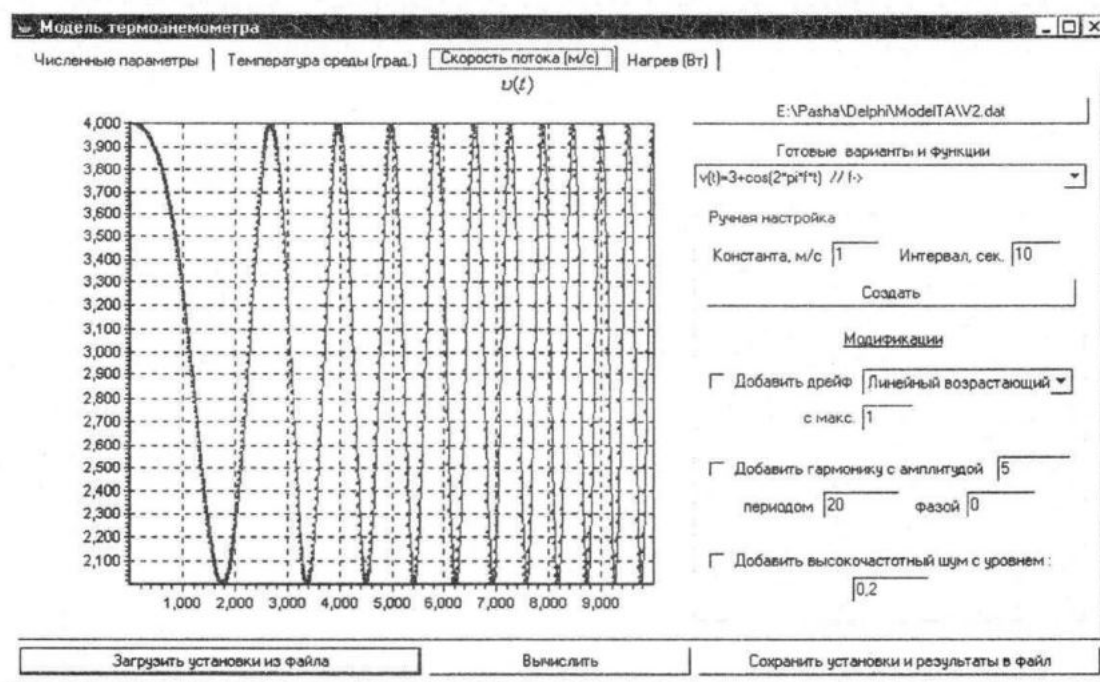


Рис. 5 - Пример ввода функции изменчивости скорости потока

Если ввод параметров и коэффициентов задается численно (см.рис.3), функции изменчивости температуры среды (в $^{\circ}\text{C}$), скорости потока (в м/с) и мощности нагрева датчика (в Дж/с) во времени могут задаваться различными способами или их комбинацией (см.рис.4-5):

- из имеющегося текстового двухколоночного файла данных;
- по заданному готовому алгоритму из пользовательского списка;
- посредством моделирования компонент (значения постоянной составляющей, синусоидальной составляющей (заданной

амплитуды, частоты и фазы), дрейфа (линейного или степенного) и добавочного высокочастотного белого шума заданного уровня).

Результаты такого моделирования (графики входных и вычисляемых температур и скоростей потока, а также графики разницы заданных и восстановленных зна-

чений) оперативно выводятся в соответствующее окно на одной координатной сетке (см.рис.6).

Любой график может масштабироваться и перемещаться с помощью мыши (см.рис.7).

Вид численного файла результатов представлен на рисунке 8.

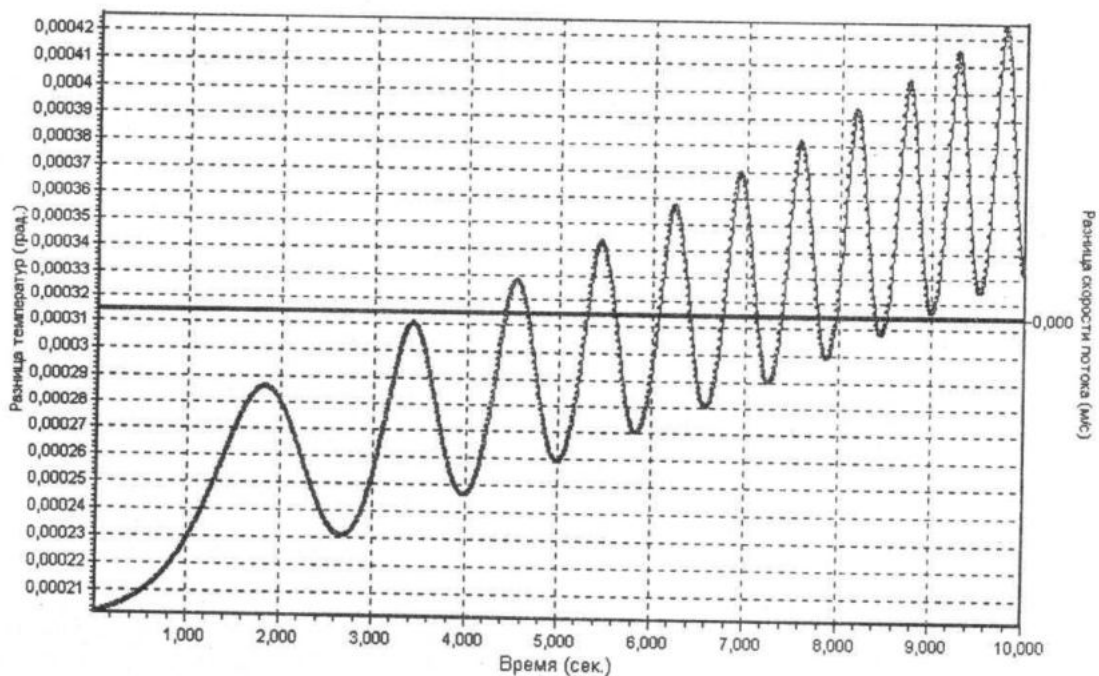
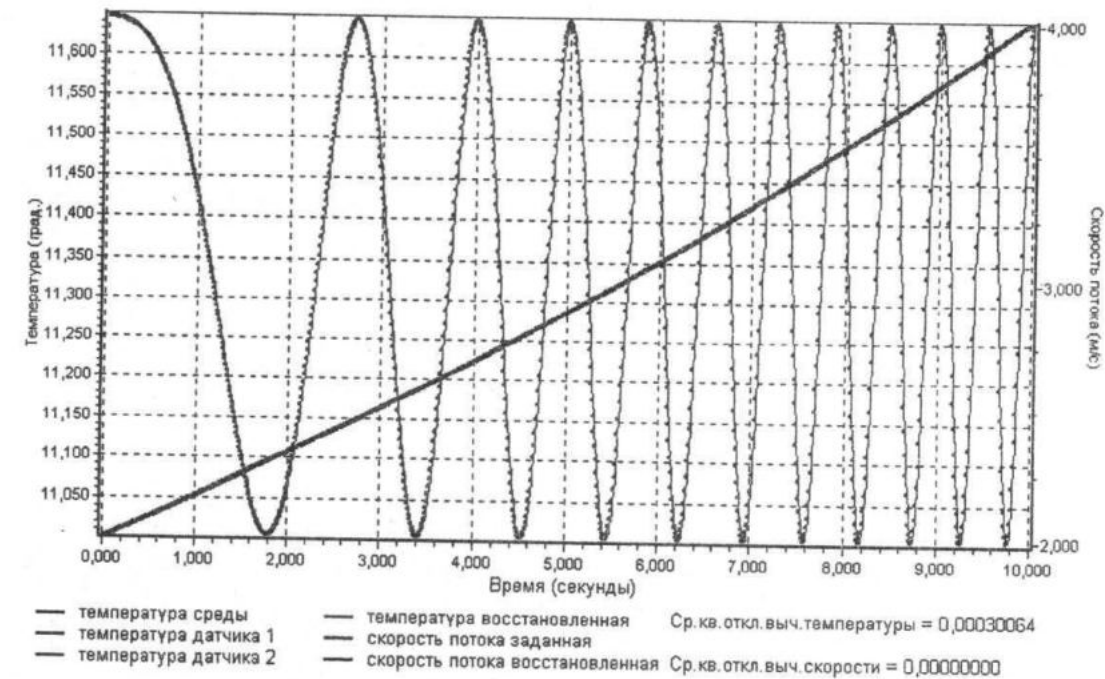


Рис. 6 - Окна графических результатов моделирования

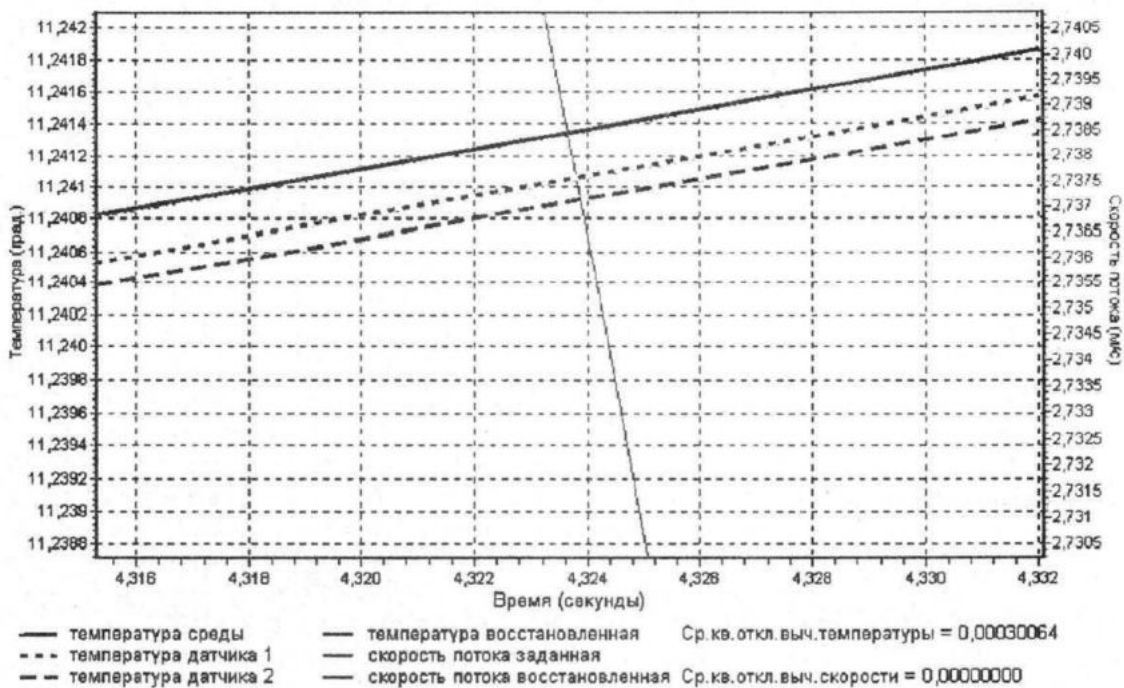


Рис. 7 - Пример масштабирования при просмотре графиков результатов

```

Кинематическая вязкость среды (м^2/с) = 1.000000000000000E-0006
Теплопроводность среды (вт/(м*К)) = 6.000000000000000E-0001
Плотность среды (кг/м^3) = 1.000000000000000E+0003
Удельная теплоемкость (Дж/(кг*К)) = 4.200000000000000E+0003
Коэффициенты: c0 = 5.000000000000000E-0001  n = 5.000000000000000E-0001

Параметры цилиндрического датчика 1
диаметр (м) = 3.000000000000000E-0003
длина (м) = 5.000000000000000E-0002
плотность материала (кг/м^3) = 8.900000000000000E+0003
уд.теплоемкость материала (Дж/(кг*К)) = 4.000000000000000E+0002

Параметры цилиндрического датчика 2
диаметр (м) = 5.000000000000000E-0003
длина (м) = 7.000000000000000E-0002
плотность материала (кг/м^3) = 8.900000000000000E+0003
уд.теплоемкость материала (Дж/(кг*К)) = 4.000000000000000E+0002

Результаты моделирования (доп.метод расчета - нет)

Time Velocity Qcp Power Qdat1 Qdat2 QdatRes DeltaQ Alpha1 Alpha2 DeltaV
0.02 4.0000 11.0010005 0.500 11.0007988 11.0006750 11.0007988 0.0002017 ...
  
```

Рис. 8 - Пример текстового файла результатов моделирования

ЛИТЕРАТУРА

1. Азизов А.М., Гордов А.Н. Точность измерительных преобразователей // -Л.: Энергия, 1975. - 256 с.
2. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. -

2-е изд., перераб. -Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. - 256 с.

3. Гайский В.А., Гайский П.В. Анализ способов измерения профиля скорости потока термопрофилимерами. Системы контроля окружающей среды: Сб.научн.тр. / НАН Украины МГИ: - Севастополь, 2001. - 450 с.