



**Методика расчета относительной влажности воздуха  
психрометрическим методом  
при помощи многоканального регистратора Ф1771-АД.  
(для диапазона температур от 0 до 90 °С)**



## 1. Вступление (Теоретическая часть).

Относительная влажность - процентное отношение упругости водяного пара, находящегося в воздухе, к упругости насыщения при данной температуре.

Определение влажности психрометрическим методом основано на разности показаний сухого и смоченного термометра. Сухой термометр показывает температуру воздуха. С поверхности смоченного термометра происходит испарение, на которое затрачивается тепло. Показания смоченного термометра зависят от интенсивности испарения воды. Чем больше дефицит влажности, тем интенсивнее будет происходить испарение и, следовательно, тем ниже будут показания смоченного термометра.

Относительную влажность парогазовой смеси  $f$  в процентах определяют по формуле:

$$f = 100 * \frac{e}{E_c(t)} \quad (1)^1$$

где

$e$  - парциальное давление водяного пара;

$E_c(t)$  - давление насыщенного водяного пара над плоской поверхностью воды, имеющей температуру  $t$ , гПа;

Парциальное давление водяного пара рассчитывается по формуле:

$$e = E_c(t') - Ap(t - t')(1 + a * t') \quad (2)^2$$

где  $E_c(t')$  – давление насыщенного водяного пара над плоской поверхностью воды, имеющей температуру  $t'$ , гПа;

$A$  – психрометрический коэффициент для парогазовой смеси с известным стандартом ее сухой части (например воздуха стандартного состава), в предположении, что вода на резервуаре смоченного термометра находится в жидком состоянии,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$p$  – общее давление парогазовой смеси, гПа;

$t$  – температура парогазовой смеси (температура сухого термометра),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t'$  – температура поверхности раздела фаз (температура смоченного термометра),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$a$  – коэффициент, учитывающий зависимость от температуры удельной теплоты фазового превращения конденсированной фазы воды в пар,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

Номинальное значение психрометрического коэффициента  $A$  являются:

$A = 0,795 * 10^{-6}$  – при естественном движении воздуха;

$A = 0,662 * 10^{-6}$  – при принудительном обдуве с номинальной скоростью 2 м/с;

При расчётах психрометрических таблиц принимают  $a = 0,00115$   $^{\circ}\text{C}^{-1}$  исходя из свойств дистиллированной воды по ГОСТ 6709-72 и состава сухого воздуха по ГОСТ 4401-81

<sup>1</sup> См. ГОСТ 8.524-85 пункт 2.7 формула (9)

<sup>2</sup> См. ГОСТ 8.524-85 пункт 2.1 формула (1)



Давление насыщенного водяного пара  $E_w(t')$  в гектопаскалях рассчитывается по формуле:

$$\lg E_w(t') = 10,79574 \left(1 - \frac{T_0}{T'}\right) - 5,02800 \lg \frac{T'}{T_0} + 1,50475 \cdot 10^{-4} * \left(1 - 10^{-8,2969 \left(\frac{T'}{T_0} - 1\right)}\right) + 0,42873 \cdot 10^{-3} \left(10^{4,76955 \left(1 - \frac{T_0}{T'}\right)} - 1\right) + 0,78614 \quad (3)^3$$

где  
 $T' = 273.15 + t', \text{ K};$   
 $T_0 = 273.15 + t_0, \text{ K};$   
 $t_0 = 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура фазового равновесия жидкой воды, льда и водяного пара (тройная точка воды).

Возможно применение упрощенной формулы расчета давление насыщенного водяного пара:

$$E = E_0 \exp\left[\frac{at}{\beta + t}\right] \quad (4)^4$$

где  $E_0 = 6.1121 \text{ гПа};$   
 $a = 17.5043$  и  $\beta = 241.2 \text{ }^\circ\text{C}$  – постоянные для воды;  
 $t$  – температура плоской поверхности воды,  $^\circ\text{C}.$

Относительная погрешность расчетов по упрощенной формуле (4) представлена в таблице 1.

Относительная погрешность %	Температура $^\circ\text{C}$							
	10	20	30	40	50	60	70	80
	-0.0132	-0.0918	-0.1204	-0.0783	0.0466	0.2604	0.5640	0.9550

Таблица 1



График 1

<sup>3</sup> См. ГОСТ 8.524-85 пункт 2.3 формула (3)

<sup>4</sup> См. ГОСТ 8.524-85 пункт 1.2 формула (2)



Расчет относительной влажности воздуха при помощи регистратора Ф1771-АД можно реализовать несколькими способами. Выбор метода зависит от необходимой точности расчета, количества математических каналов и таблиц не занятых другими задачами и пр.

**2. Расчет относительной влажности воздуха при помощи психрометрической таблицы.**

Метод основан на табличном преобразовании измеренного значения в математическом канале многоканального регистратора Ф1771-АД.

**2.1 Психрометрическая таблица.**

На рис. 1 представлен фрагмент психрометрической таблицы. Заглавие строк – температура сухого термометра, заглавия столбцов – разность показаний сухого и влажного термометров.

Температура сухого термометра °С	Психрометрическая разность °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	100	90	81	72	64	56	48	40	32	25	18
21	100	91	82	73	65	57	49	42	34	27	20
22	100	91	82	74	66	58	50	43	36	29	23
23	100	91	83	75	67	59	52	45	38	31	25
24	100	91	83	75	67	60	53	46	39	33	26
25	100	92	84	76	68	61	54	47	41	34	28

Рис.1

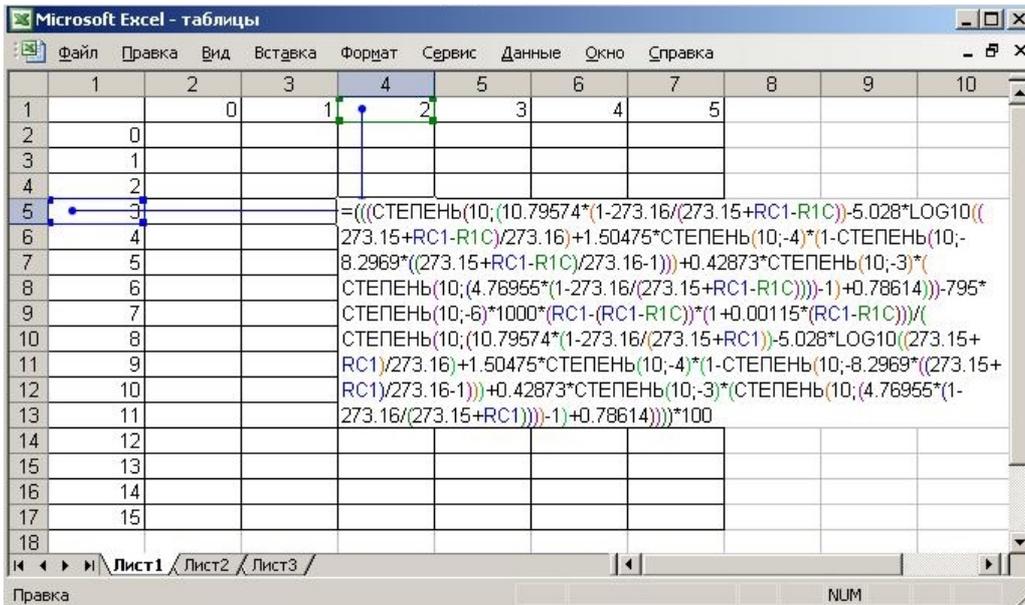
Для расчета относительной влажности может быть использована психрометрическая таблица для диапазона 0-90 °С.

**2.2 Метод построения номинальной психрометрической таблицы в MS Excel.**

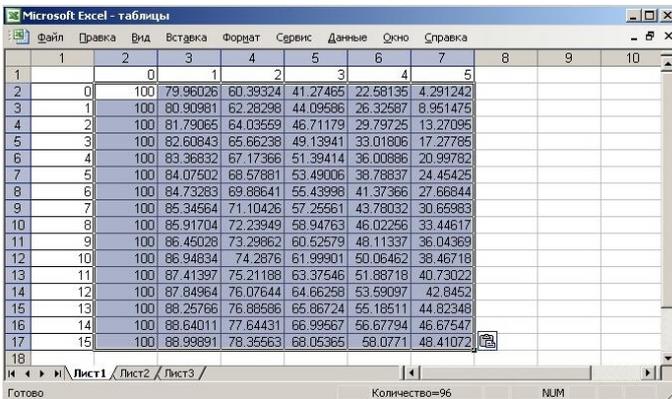
Для построения психрометрической таблицы в приложении MS Excel, в столбец №1 заносятся показания сухого термометра (со второй строки), в строку №1 заносятся значения психрометрической разности (со второго столбца), как показано на рисунке 2. Во все ячейки диапазона (рис.3) копируется формула:

$$=(((\text{СТЕПЕНЬ}(10;(10.79574*(1-273.16/(273.15+RC1-R1C))-5.028*\text{LOG}10((273.15+RC1-R1C)/273.16)+1.50475*\text{СТЕПЕНЬ}(10;-4)*(1-\text{СТЕПЕНЬ}(10;-8.2969*((273.15+RC1-R1C)/273.16-1))))+0.42873*\text{СТЕПЕНЬ}(10;-3)*(\text{СТЕПЕНЬ}(10;(4.76955*(1-273.16/(273.15+RC1-R1C))))-1)+0.78614))))-795*\text{СТЕПЕНЬ}(10;-6)*1000*(RC1-(RC1-R1C))*(1+0.00115*(RC1-R1C)))/(\text{СТЕПЕНЬ}(10;(10.79574*(1-273.16/(273.15+RC1))-5.028*\text{LOG}10((273.15+RC1)/273.16)+1.50475*\text{СТЕПЕНЬ}(10;-4)*(1-\text{СТЕПЕНЬ}(10;-8.2969*((273.15+RC1)/273.16-1))))+0.42873*\text{СТЕПЕНЬ}(10;-3)*(\text{СТЕПЕНЬ}(10;(4.76955*(1-273.16/(273.15+RC1))))-1)+0.78614))))*100$$

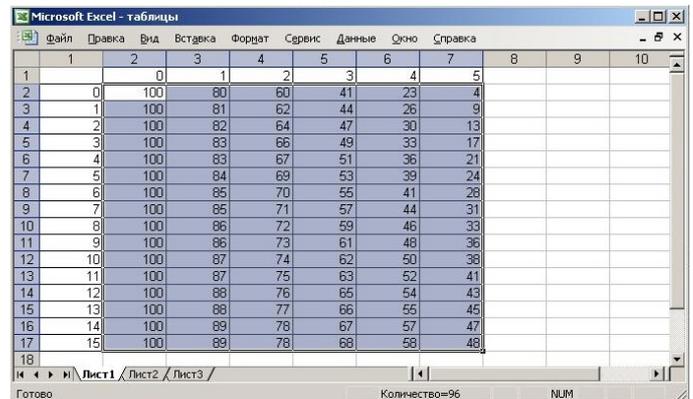
(выражение составлено на основе формулы (1), (2), (3). Психрометрический коэффициент  $A = 0,795 \cdot 10^{-6}$ , общее давление парогазовой смеси  $p=1000$  гПа, коэффициент  $a=0,00115$ )



**Рис.2**



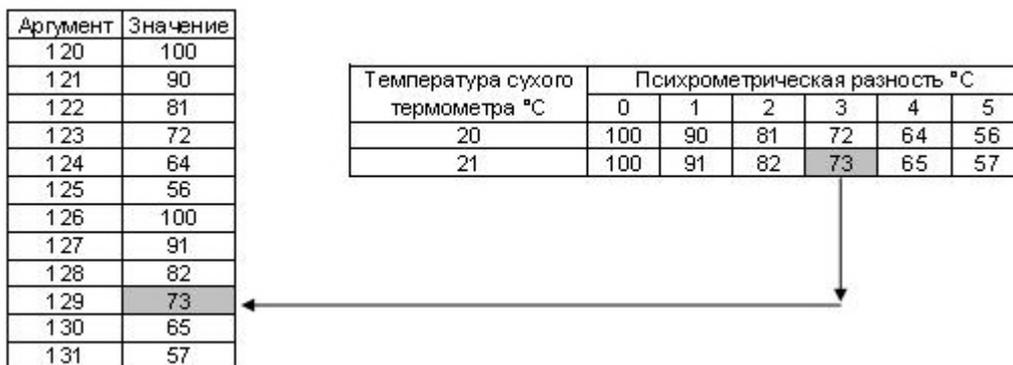
**Рис.3**



**Рис.4**

### 2.3 Преобразование таблицы.

Для использования таблицы в регистраторе Ф1771-АД ее необходимо преобразовать в двумерный массив.



**Рис.5**

Рисунок 5 иллюстрирует принцип преобразования таблицы:

Аргумент =  $T_{\text{сух.}} * [\text{количество столбцов}] + (T_{\text{сух.}} - T_{\text{вла.}})$ ;

где

$T_{\text{сух.}}$  – показания сухого термометра;

$(T_{\text{сух.}} - T_{\text{вла.}})$  – психометрическая разность;

Например, Тсух. = 21°C, Твла. = 18°C, количество столбцов = 6;  
 Аргумент=21\*6+(21-18)=129, значение=73;

Таблицы в многоканальном регистраторе Ф1771-АД можно заполнять непосредственно на приборе, при помощи сенсорного экрана или импортировать из файла \*.csv. Для импорта таблицы из файла \*.csv, необходимо сохранить таблицу (преобразованную согласно пункту 2.3) на карту MMS, вставить карту в прибор и нажать кнопку «Импорт данных CSV» в меню «Таблицы». Выбрать из списка необходимый файл и нажать «Загрузить».



**Рис.6**



**Рис.7**

## 2.4 Значения температуры.

Для использования психрометрической таблицы, показанной выше, необходимо, чтобы значения температуры были целыми числами. Для этого, в настройке каналов следует задать значение параметра «Знаков после запятой» равное 0.

Если значение температуры необходимо отображать и записывать в архив с большей дискретностью, то перед использованием значения температуры его следует округлить до целого.

Вариант 1.

Для округления значения канала, его значение можно присвоить математическому каналу, в настройках шкалы которого следует задать значение параметра «Знаков после запятой» равное 0.

Вариант 2.

Округление значений канала производится при помощи таблицы, которая содержит все возможные значения параметра. Каждый интервал значений записывается в виде двух строк с одинаковым результатом. Линейная интерполяция – отключена.



№	Аргумент	Результат
1	0	0
2	0.444	0
3	0.5	1
4	1.444	1
5	1.5	2
6	2.444	2
7	2.5	3
8	3.444	3
9	3.5	4
10	4.444	4

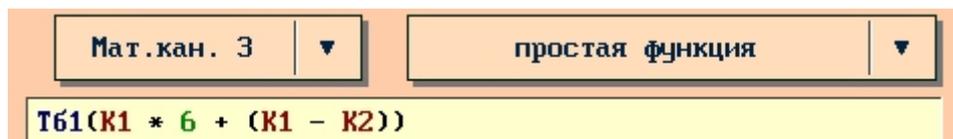
записи с  по

линейная интерполяция

Рис.8

## 2.5 Значение математического канала.

На рисунке 9 показаны настройки математического канала для расчета относительной влажности воздуха.



Мат. кан. 3    простая функция

$T_{б1}(K1 * 6 + (K1 - K2))$

Рис.9

где

**T<sub>б1</sub>** – психрометрическая таблица;

**K1** – значение измерительного канала 1, сухой термометр;

**K2** – значение измерительного канала 2, влажный термометр;

**6** - количество столбцов (количество вариантов психрометрической разности);

Если значения измерительных каналов необходимо округлить (п.2.4), то выражение математического канала будет иметь вид, показанный на рисунке 10.



Мат. кан. 3 ▾      простая функция ▾

$T_{61}(T_{64}(K1) * 6 + (T_{64}(K1) - T_{64}(K2)))$

Рис.10

где  
**T61** – психрометрическая таблица;  
**T64** – таблица для округления (рис.8);  
**K1** – значение измерительного канала 1, сухой термометр;  
**K2** – значение измерительного канала 2, влажный термометр;  
**6** - количество столбцов;

**2.6 Сокращение числа строк таблицы.**

Если показания сухого и влажного термометров равны, то относительная влажность воздуха равна 100%. Это позволяет исключить все строки психрометрической таблицы, где разность температур сухого и влажного термометра равна 0 и заменить их следующим выражением:

Мат. кан. 3 ▾      простая функция ▾

$T_{61}(K1 * 6 + (K1 - K2)) * T_{65}(K1 - K2) + \text{sqrt}((T_{65}(K1 - K2) - 1)^2) * 100$

Рис.11

где  
**T61** – психрометрическая таблица (Рис.12);  
**K1** – значение измерительного канала 1, сухой термометр;  
**K2** – значение измерительного канала 2, влажный термометр;  
**6** – количество столбцов;  
**T65** – таблица, возвращает 0 при аргументе 0, и 1 при любом другом аргументе (Рис.13).  
(для правильной работы таблицы 5 флажок «Линейная интерполяция» должен быть включен.)

Таблица 1 ▾      Имя: Влажность

№	Аргумент	Результат
1	121	90
2	122	81
3	123	72
4	124	64
5	125	56
6	127	91
7	128	82
8	129	73
9	130	65
10	131	57

▲ Вверх  
▼ Вниз  
Добавить  
Изменить

записи с [ ] по [ ]      Удалить

Импорт данных CSV       линейная интерполяция

Рис.12

Таблица 5 ▾      Имя:

№	Аргумент	Результат
1	0	0
2	0.1	1
3	9999	1

▲ Вверх  
▼ Вниз  
Добавить  
Изменить

записи с [ 1 ] по [ 1 ]      Удалить

Импорт данных CSV       линейная интерполяция

Рис.13

$\text{sqrt}((T_{65}(K1-K2)-1)^2)$  – выражение возвращает значение обратное  $T_{65}(K1-K2)$   
 $T_{65}(K1-K2) = 0, \sqrt{(T_{65}(K1 - K2) - 1)^2} = 1;$   
 $T_{65}(K1-K2) = 1, \sqrt{(T_{65}(K1 - K2) - 1)^2} = 0;$

Таким образом, при  $(K1-K2)=0$ , выражение всегда равно 100.

### 2.7 Расчет количества значений в таблице.

Многоканальный регистратор Ф1771-АД позволяет использовать от 1 до 5 таблиц. Суммарное количество строк всех таблиц – 1024 строки.

Таким образом, возможно использование психрометрической таблицы с диапазоном температуры сухого термометра 0-100 °С и психрометрической разностью от 0 до 9.

При использовании таблицы округления (Рис.8), возможно использование психрометрической таблицы с диапазоном температуры сухого термометра 0-100 °С и психрометрической разностью от 0 до 7 (с диапазоном температуры сухого термометра 0-80 °С и психрометрической разностью от 0 до 9).

### 2.8 Недостатки и преимущества табличного преобразования.

Главный недостаток данного метода расчета относительной влажности – в выражении могут участвовать только целые значения температуры.

Достоинством данного метода является простота настройки и малые затраты ресурсов прибора – 1 мат канал и одна таблица (1 мат канал и 2 таблицы для второго варианта).

Кроме того, данный метод может использоваться, если расчет должен проводиться по специальной психрометрической таблице, значения которой нельзя получить при помощи формул.

### 3. Расчет относительной влажности воздуха при помощи формулы

Для получения более точного значения относительной влажности следует использовать формулу. Формула (3), - давление насыщенного водяного пара содержит большое количество элементов, поэтому ее применение нецелесообразно. Для расчета относительной влажности воздуха следует использовать формулы (1), (2) и (4).

#### 3.1 Настройка математического канала

Выражение математического канала регистратора Ф1771-АД может содержать до 48 аргументов (12 констант). Если выражение содержит большее число аргументов, то его следует разбить на несколько частей и записать в 2 и более канала.



Рис.14



Рис.15

В математическом канале 3 (Рис.14) производится расчет парциального давления водяного пара (2). Полученный результат используется в математическом канале 4, для вычисления относительной влажности воздуха (Рис.15).

#### 3.2 Использование таблицы для хранения констант

Константы, используемые в выражении математического канала можно сохранить в таблице. Это позволит вносить изменения в расчеты, не изменяя самого выражения. Так как аргумент таблицы, в данном случае используется только в качестве ссылки на определенную строку таблицы и никак не связан с другими аргументами, одну таблицу можно использовать для хранения констант разных выражений, или использовать существующую таблицу, подобрав специальный аргумент.

Таблица 1    Имя: Константы

№	Аргумент	Результат
1	1	795
2	2	1000
3	3	0.00115

▲ Вверх  
▼ Вниз  
Добавить  
Изменить

записи с 1 по 1    Удалить

Импорт данных CSV     линейная интерполяция

Рис.16

Мат.кан. 3    простая функция

$$(6.112 * \exp(17.5 * K2 / (241.2 + K2)) - T61(1) * 10^{-6} * T61(2) * (K1 - K2) * (1 + T61(3) * K2))$$

Рис.17

На рисунке 17 в выражении математического канала 3 константы заменены ссылками на строки таблицы:

$T61(1) = 795$ ;  $T6(2) = 1000$ ;  $T61(3) = 0.00115$ .

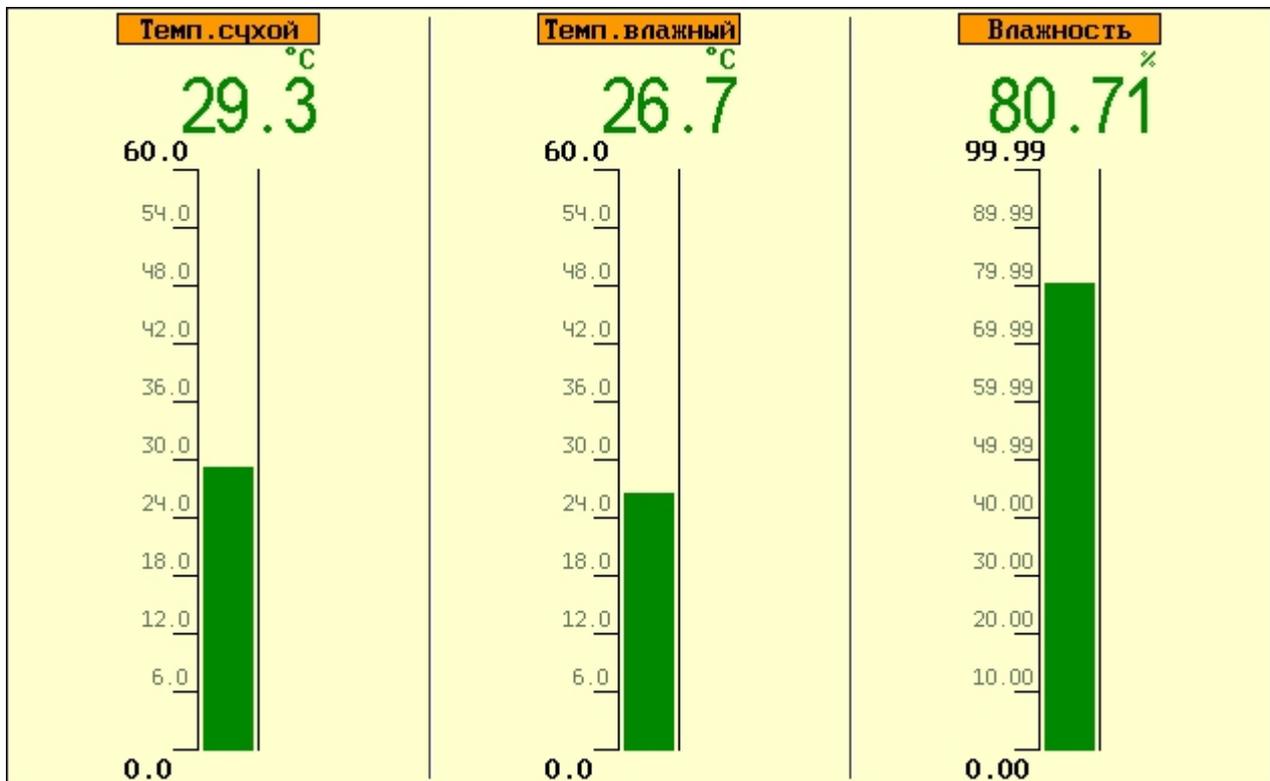


Рис.18

#### 4. Расчет относительной влажности воздуха при помощи таблицы и формулы

Недостатком расчета относительной влажности воздуха описанным в разделе 3.1 является необходимость использования 2-х математических каналов. Для сокращения числа аргументов выражения, параметр «давление насыщенного водяного пара» для сухого и влажного термометров, можно представить в виде таблицы (Рис.19). Для этого можно использовать существующие таблицы «Насыщающая упругость водяного пара над поверхностью воды при различных температурах» или создать самостоятельно (см. п4.1) при помощи формулы (3).



Таблица 5    Имя: E(Tc)\_E(Tв)

№	Аргумент	Результат
1	0	6.1078
2	0.1	6.15224
3	0.2	6.19697
4	0.3	6.24199
5	0.4	6.2873
6	0.5	6.3329
7	0.6	6.37879
8	0.7	6.42498
9	0.8	6.47146
10	0.9	6.51825

▲ Вверх  
▼ Вниз  
Добавить  
Изменить

записи с 1 по 1    Удалить

Импорт данных CSV     линейная интерполяция

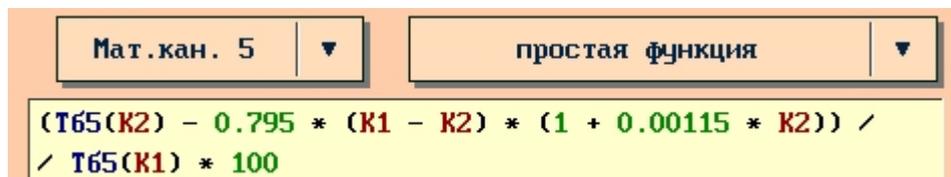
Рис.19

Это позволяет значительно сократить число аргументов математического канала.

Выражение  $6.112 \cdot \exp(17.5 \cdot K2 / (241.2 + K2))$  заменяется на  $T65(K1)$ ;

Выражение  $6.112 \cdot \exp(17.5 \cdot K1 / (241.2 + K1))$  заменяется на  $T65(K2)$ ;

Настройки математического канала изображены на рисунке 20.



Мат.кан. 5    простая функция

$$\frac{(T65(K2) - 0.795 * (K1 - K2) * (1 + 0.00115 * K2))}{T65(K1) * 100}$$

Рис.20

#### 4.1 Метод создания таблицы «Давление насыщенного водяного пара $E_w(t')$ » в MS Excel.

Для создания таблицы «Давление насыщенного пара» в столбец №1 записываются значения температуры, а в столбец №2 копируется формула:

«=СТЕПЕНЬ(10;(10.79574\*(1-273.16/(273.15+RC1)))-  
5.028\*LOG10((273.15+RC1)/273.16)+1.50475\*СТЕПЕНЬ(10;-4)\*(1-СТЕПЕНЬ(10;-  
8.2969\*((273.15+RC1)/273.16-1)))+0.42873\*СТЕПЕНЬ(10;-3)\*(СТЕПЕНЬ(10;(4.76955\*(1-  
273.16/(273.15+RC1))))-1)+0.78614)»

(выражение составлено на основе формулы (3)).