

НАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ



«Утверждаю»

Проректор по научной работе НМетАУ

Проф. Фройдак Ю.С.

«01» июня 2010

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о испытаниях керамического теплоизоляционного покрытия «Тезолат»

Заведующий кафедрой промышленной
теплоэнергетики НМетАУ, проф., д.т.н.

Губинский М.В.

Днепропетровск - 2010

Определение теплофизических характеристик покрытия керамического теплоизоляционного «Тезолат»

ВВЕДЕНИЕ

Теплоизоляционное покрытие «Тезолат» основано на использовании керамических микросфер определяющих уникальные свойства данного покрытия. Они состоят в том, что это покрытие изменяет поглощательную способность (степень черноты) тела, показывающую долю падающего теплового потока поглощаемого телом, остальная часть теплового потока отражается. Большинство твердых тел (стен зданий, металлические поверхности труб, емкостей и т.д.) имеют степень черноты равную $\epsilon=0,8-0,9$, то есть 80%-90% падающего лучистого потока на поверхности тел поглощается этими телами.

Покрытие «Тезолат» позволяет снизить степень черноты и, таким образом, уменьшить потери теплоты излучением. Кроме этого, покрытие имеет теплопроводность значительно более низкую, чем металл и является прямым термическим сопротивлением для передачи теплоты через покрытие.

Кроме этого теплоотдача в окружающую среду осуществляется так же конвекцией естественной (вызванной разницей температур поверхности и окружающего воздуха) или вынужденной (при наличии ветра). Величина коэффициента теплоотдачи конвекцией зависит от температуры поверхности тела, которая изменяется от нанесения покрытия «Тезолат». Таким образом, при определении теплофизических свойств покрытия необходимо исключить влияние конвекции. Поэтому измерения свойств необходимо проводили в условиях вакуума.

Особенностью покрытия является также сложность достоверного измерения температуры его поверхности известными способами (пирометр, термопара), поэтому методика измерений не должна предполагать этого.

Исходя из выше сказанного, была разработана оригинальная методика комплексного определения степени черноты покрытия $\epsilon_{кр}$ и коэффициента теплопроводности $\lambda_{кр}$, позволяющих проводить расчеты тепловых потоков для реальных условий эксплуатации объектов с покрытием «Тезолат».

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение теплофизических свойств покрытия проводились в вакууме, в камере сушки универсального вакуумного поста ВУП-2К, обеспечивающего предварительный вакуум 10^{-3} мм.рт.ст. Для проведения исследований изготовлено специальное приспособление, закрепленное на крышке камеры сушки. Общий вид ВУП-2К и приспособления приведен на рис. 1-3.



Рис.1 Универсальный вакуумный пост ВУП-2К



Рис.2 Камера сушки установки ВУП-2К

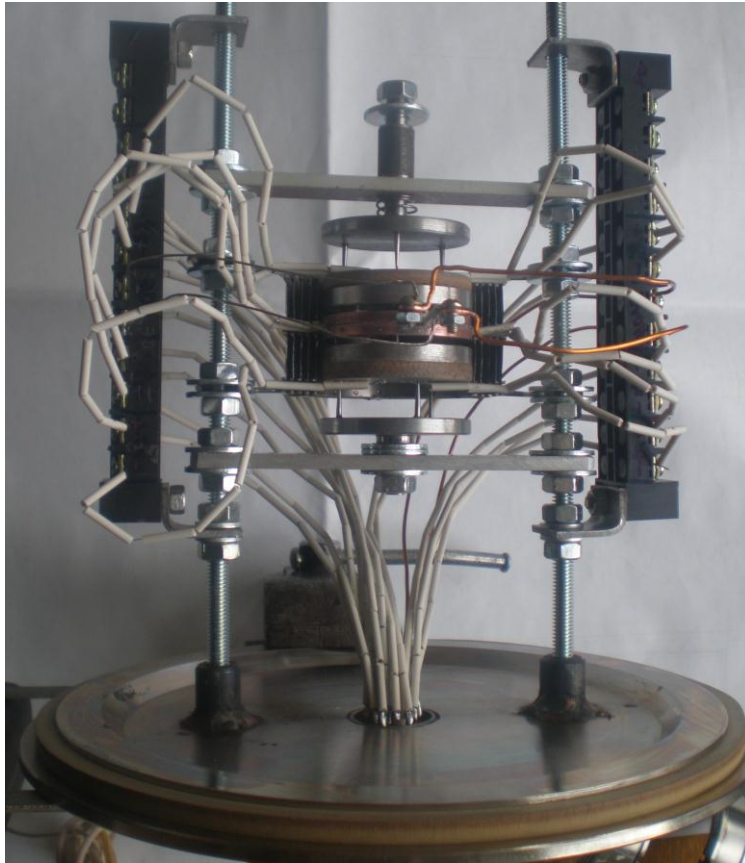


Рис.3 Общий вид приспособления на крышке камеры сушки

Приспособление состоит из измерительной ячейки, двух клеммных колодок и вакуумного разъема для подвода электрической мощности и вывода показаний термоэлектрических термометров типа ХА в электронный блок, преобразующий за 1 секунду 16 аналоговых сигналов в цифровые и передающий эти данные в ЭВМ через USB порт. Программный комплекс ЭВМ преобразует эти данные в виде графической информации на экране монитора и позволяет их сохранить в формате Microsoft Excel.

Измерительная ячейка включает расположенный посередине медный электрический нагреватель и два металлических образца $\varnothing 40$ мм, удаленных от него на расстояние 2мм. Указанный зазор обеспечивался тремя иглами, что практически исключает передачу тепла от нагревателя к острию игл, а соответственно и к образцам теплопроводностью. Для увеличения перепада температур по толщине образцов, к последним приклеены текстолитовые шайбы того же диаметра и толщиной 4мм. Общий вид измерительной ячейки приведен на рис. 4.

Проведение исследований в вакууме исключает действие свободной конвекции, и передача теплоты от торцевых поверхностей нагревателя к образцам осуществляется только излучением. Для максимального снижения потерь лучистой энергии в вакуумную камеру от цилиндрических поверхностей нагревателя и образцов, последние окружены пятью отражающими экранами из нержавеющей фольги с низкой степенью черноты ($\epsilon = 0,2 \div 0,3$). При этом полностью исключить потери от цилиндрических поверхностей в камеру невозможно, поэто-

му измерения проводились сначала при нагреве образцов без покрытия, при температурах нагревателя 120 °С, 200 °С и 275°С, а также после нанесения 2мм слоя покрытия «Тезолат» (последовательно слоями по 0,5мм) при тех же температурах нагревателя. Это позволило иметь равные потери в двух опытах.

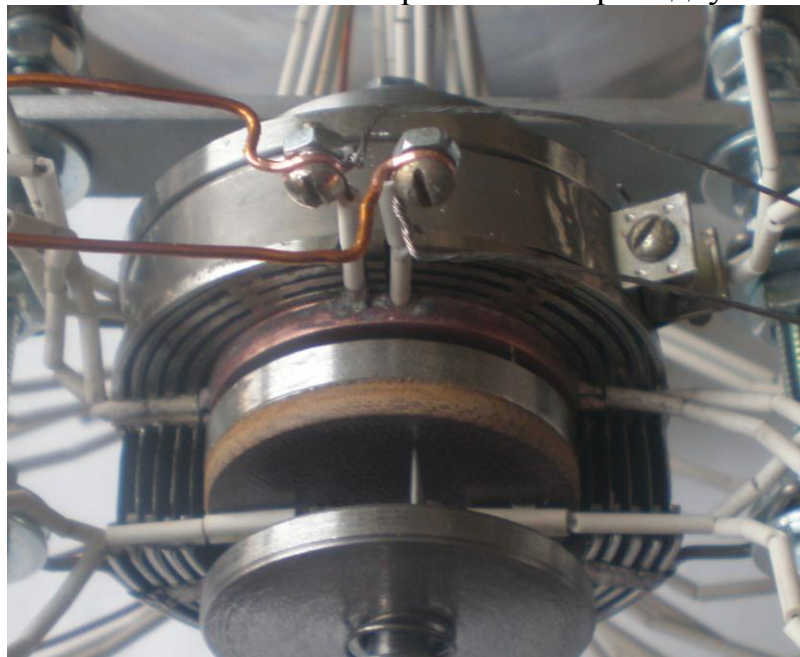


Рис.4. Общий вид измерительной ячейки

Схема расположения термодпар и основные размеры измерительной ячейки показаны на рис.5. Двухслойные образцы (Ст20 и текстолит) опираются на нагреватель тремя иглками Ø 0,5мм. Металлическая часть образца имеет выборку глубиной 2мм для нанесения теплоизоляционного покрытия.

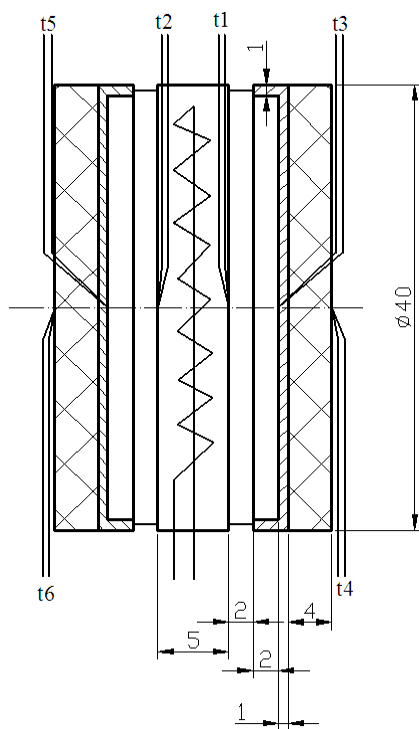


Рис.5 Схема размещения термопар и основные размеры измерительной ячейки.

Измерения проводились после наступления стационарного теплового состояния, т.е. когда все температуры практически не изменялись во времени. В вакууме длительность этого процесса составила от 8 до 10 час.

Результаты измерений и их обработка

Графики нагрева образцов в вакуумной камере без теплоизоляционного покрытия в период стационарного теплового состояния приведены на рис. 6÷8, а значения температур после линейной интерполяции, а также значение электрической мощности нагревателя приведены в таблице 1.

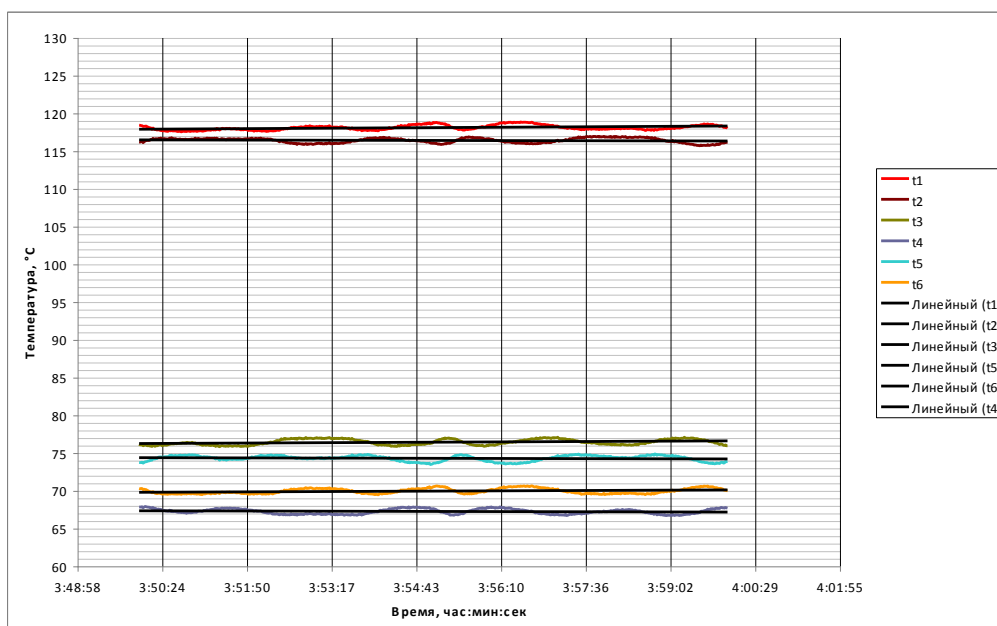


Рис.6 Средняя температура нагревателя 117,33 °C

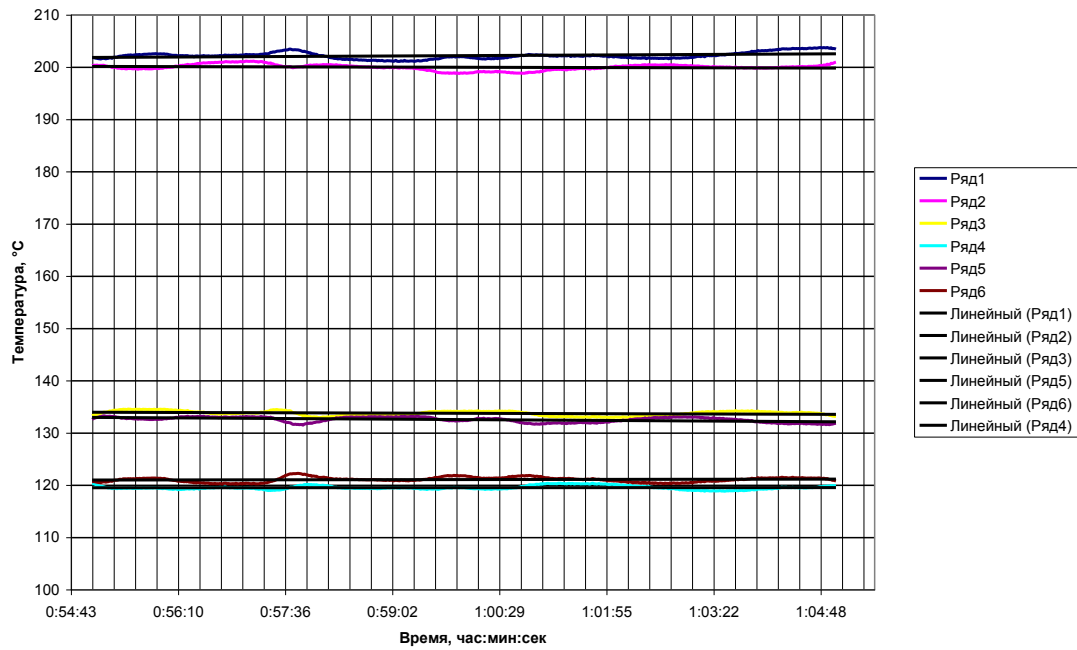


Рис.7 Средняя температура нагревателя 201,29 °С

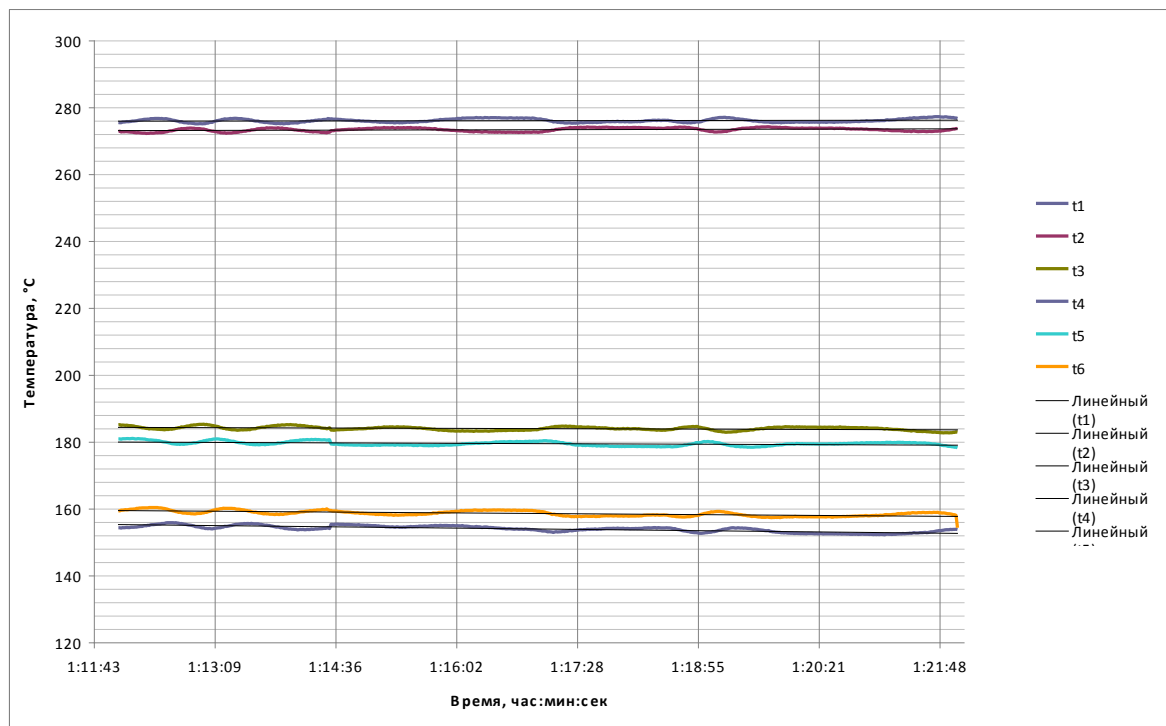


Рис.8 Средняя температура нагревателя 274,79 °С

Таблица 1 – Температуры нагревателя, образца без покрытия, а также: ток, напряжение и мощность нагревателя.

$t_{\text{нагр. сред.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{обр. сред.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{текст. сред.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$U_{\text{нагр.}} \text{ В}$	$I_{\text{нагр.}} \text{ А}$	$P_{\text{нагр.}} \text{ Вт}$
117,33	75,43	68,56	1,4	0,9	1,256
201,29	132,85	120,21	2,3	1,5	3,442
274,79	181,81	156,36	3,3	2,1	6,93

По данным таблицы 1, рассчитывался лучистый тепловой поток между торцевыми поверхностями нагревателя и образца при степени черноты этих поверхностей, равной 0,8.

$$\varepsilon_{\text{H}}=0,8; \quad \varepsilon_{\text{O}}=0,8; \quad \varepsilon_{\text{ид}} := \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_1} - 1}$$

$$Q_{\text{эцэ}} := \varepsilon_{\text{ид}} \cdot 5.67 \left[\left(\frac{t_{\text{аа.нð}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{аð.нð}} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 3.14 \frac{0.04^2}{4}$$

$$\lambda_{\text{ðáæñ}} := 0.28 \quad \delta_{\text{ñð}} := 0.001$$

$$\lambda_{\text{ñð}} := 51 \quad \delta_{\text{ðáæñ}} := 0.001$$

Также рассчитывался тепловой поток теплопроводностью через двухслойный образец при следующих значениях коэффициентов теплопроводности стального образца и текстолита:

$$Q_{\text{ðáðë}} := \frac{t_{\text{аð.нð}} - t_{\text{ðáæñ.нð}}}{\frac{\delta_{\text{ñð}}}{\lambda_{\text{ñð}}} + \frac{\delta_{\text{ðáæñ}}}{\lambda_{\text{ðáæñ}}}} \cdot \left(3.14 \frac{0.04^2}{4} \right)$$

Результаты расчетов тепловых потоков излучением и теплопроводностью, а также величина потерь приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов тепловых потоков излучением и теплопроводностью, а также потерь лучистой энергии.

$t_{\text{нагр. сред.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{луч.}} \text{ Вт}$	$Q_{\text{тепл.}} \text{ Вт}$	$P_{\text{нагр.}} \text{ Вт}$	$Q_{\text{пот.}} \text{ } \%$
117,33	0,805	0,776	1,256	35,91
201,29	2,229	2,214	3,442	35,26
274,79	4,487	4,457	6,930	35,25

Нагрев образцов с термоизоляционным покрытием «Тезолат»

Графики нагрева образцов в вакуумной камере с теплоизоляционным покрытием в период стационарного теплового состояния приведены на рис. 9÷11, а значения температур после линейной интерполяции, а также значение электрической мощности нагревателя приведены в таблице 3.

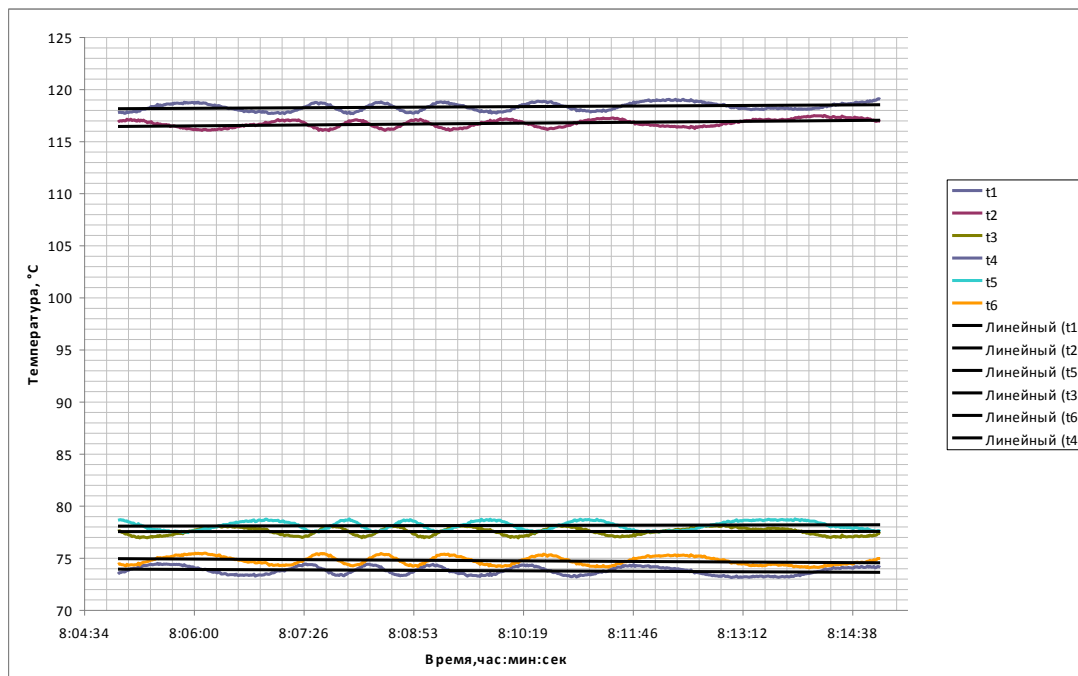


Рис.9 Средняя температура нагревателя 117,55 °С

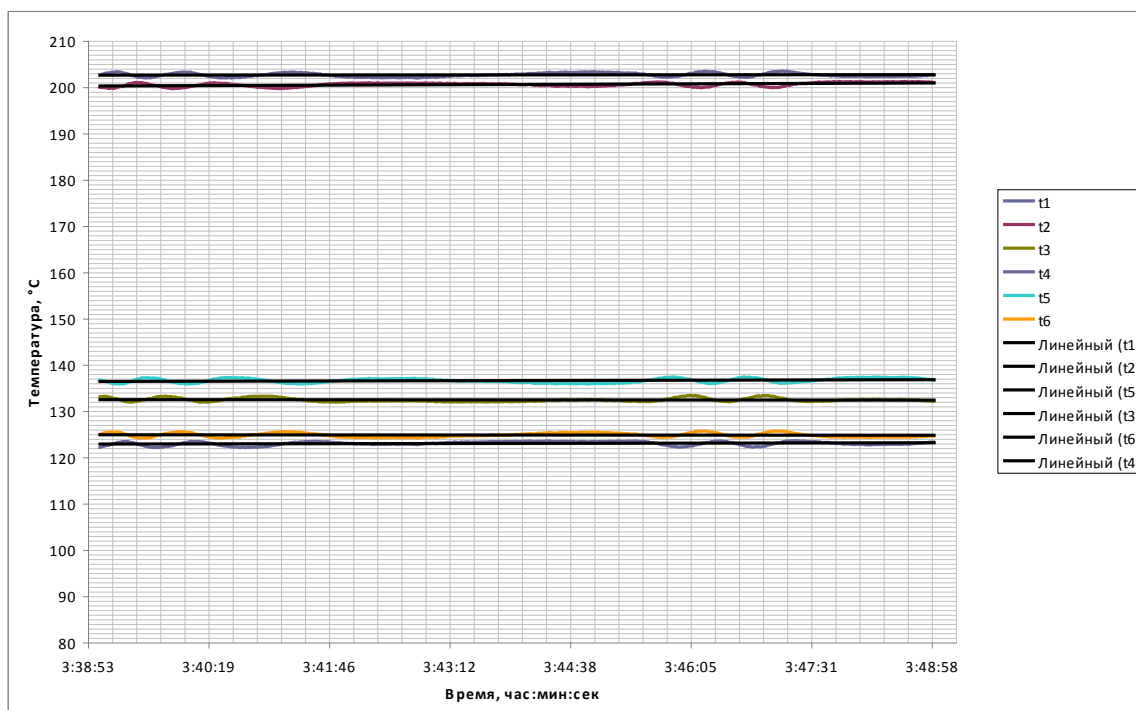


Рис.10 Средняя температура нагревателя 201,71 °С

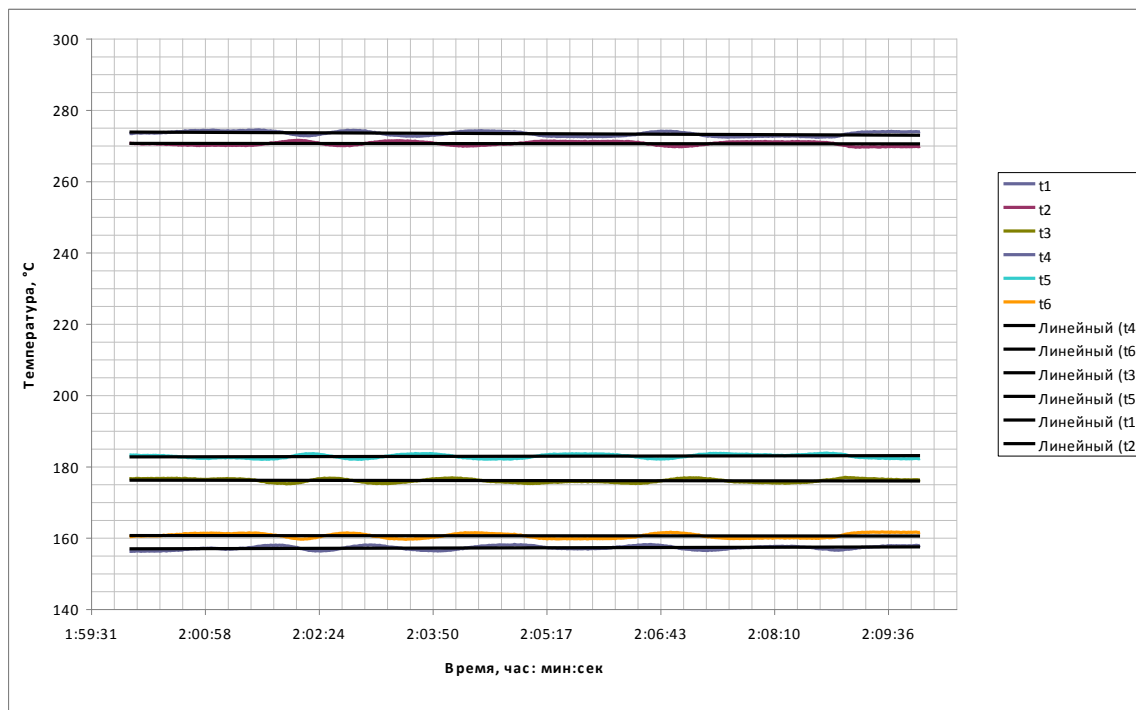


Рис.11 Средняя температура нагревателя 272,06 °С

Таблица 3 – Температуры нагревателя, образца с краской, а также: ток, напряжение и мощность нагревателя.

$t_{\text{нагр. сред.}} \text{, } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{обр. сред.}} \text{, } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{текст. сред.}} \text{, } ^\circ\text{C}$	$U_{\text{нагр.}} \text{, В}$	$I_{\text{нагр.}} \text{, А}$	$P_{\text{нагр.}} \text{, Вт}$
117,55	77,85	74,19	1,26	0,8	1,008
201,71	134,6	124,6	2,02	1,38	2,788
272,06	179,55	159,39	3,11	1,76	5,474

По разности температур $t_{\text{обр. сред.}}$ и $t_{\text{текст. сред.}}$ (таблица 3), рассчитывался тепловой поток теплопроводностью через двухслойный образец при $\lambda_{\text{ст20}}=51$, $\lambda_{\text{текст}}=0,28$ Вт/(м·К). Данные расчета тепловых потоков и потерь электрической мощности приведены в таблице 4.

$$Q_{\text{дате}} := \frac{t_{\text{ад.нд}} - t_{\text{даен.нд}}}{\frac{\delta_{\text{нд}}}{\lambda_{\text{нд}}} + \frac{\delta_{\text{даен}}}{\lambda_{\text{даен}}}} \cdot \left(3.14 \frac{0.04^2}{4} \right)$$

Таблица 4 – Результаты расчетов теплопроводностью, а также величина потерь электрической мощности.

$t_{\text{обр. сред.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{текст. сред.}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{тепл.}} \text{ ВТ}$	$P_{\text{нагр.}} \text{ ВТ}$	$Q_{\text{пот.}} \text{ } \%$
77,85	74,19	0,645	1,008	36,0
134,6	124,6	1,759	2,788	36,9
179,55	159,39	3,546	5,474	35,22

Коэффициент теплопроводности покрытия и степень её черноты принимались постоянными в интервале температур образца $77,85 \div 134,6^\circ\text{C}$ и рассчитывались из решения нелинейного уравнения по данным тепловых потоков при этих температурах из выражения.

$$\text{lam} := \left(q1 \cdot T_{i2}^4 - q2 \cdot T_{i1}^4 \right) - \left[q1 \cdot \left(T_{iá2} + q2 \cdot \frac{\delta_{\text{eđ}}}{\lambda_{\text{eđ1}}} \right)^4 - q2 \cdot \left(T_{iá1} + q1 \cdot \frac{\delta_{\text{eđ}}}{\lambda_{\text{eđ1}}} \right)^4 \right] = 0 \text{ solve, } \lambda_{\text{eđ1}} \rightarrow \begin{bmatrix} -0.66415118942107775712e-2 \\ (-.19141259192822670278q-2 .73729749266179 \\ (-.19141259192822670278q-2 .73729749266179 \\ .30296067089884422072 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\text{eđ1}} := \text{lam}_3$$

$$\lambda_{\text{eđ1}} = 0.303$$

$$\varepsilon_{\text{eđ1}} := \frac{1}{1 - \frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{\sigma_0}{q1} \cdot \left[T_{i1}^4 - \left(T_{iá1} + q1 \cdot \frac{\delta_{\text{eđ}}}{\lambda_{\text{eđ1}}} \right)^4 \right]}$$

$$\varepsilon_{\text{eđ1}} = 0.678$$

$$\varepsilon_{\text{eđ2}} := \frac{1}{1 - \frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{\sigma_0}{q2} \cdot \left[T_{i2}^4 - \left(T_{iá2} + q2 \cdot \frac{\delta_{\text{eđ}}}{\lambda_{\text{eđ1}}} \right)^4 \right]}$$

$$\varepsilon_{\text{eđ2}} = 0.678$$

Аналогичные расчеты выполнены в интервале температур образца $134,6 \div 179,55^\circ\text{C}$.

$$\text{lam} := \left(q2 \cdot T_{i3}^4 - q3 \cdot T_{i2}^4 \right) - \left[q2 \cdot \left(T_{iá3} + q3 \cdot \frac{\delta_{\text{eđ}}}{\lambda_{\text{eđ3}}} \right)^4 - q3 \cdot \left(T_{iá2} + q2 \cdot \frac{\delta_{\text{eđ}}}{\lambda_{\text{eđ3}}} \right)^4 \right] = 0 \text{ solve, } \lambda_{\text{eđ3}} \rightarrow \begin{bmatrix} -0.12104640254405196680e-1 \\ (-.36973893470788236899q-2 .12311848843266031538ei2 \\ (-.36973893470788236899q-2 .12311848843266031538ei2 \\ .34456706831251898343 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\text{eđ3}} := \text{lam}_3$$

$$\lambda_{\text{eđ3}} = 0.345$$

$$\varepsilon_{\text{eđ1}} := \frac{1}{1 - \frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{\sigma_0}{q2} \cdot \left[T_{i2}^4 - \left(T_{iá2} + q2 \cdot \frac{\delta_{\text{eđ}}}{\lambda_{\text{eđ3}}} \right)^4 \right]}$$

$$\varepsilon_{\text{eđ1}} = 0.672$$

$$\varepsilon_{\text{eđ2}} := \frac{1}{1 - \frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{\sigma_0}{q3} \cdot \left[T_{i3}^4 - \left(T_{iá3} + q3 \cdot \frac{\delta_{\text{eđ}}}{\lambda_{\text{eđ3}}} \right)^4 \right]}$$

$$\varepsilon_{\text{eđ2}} = 0.672$$

Таким образом, теплопроводность покрытия составляет $\lambda=0,3-0,34$ Вт/мК, а степень черноты соответственно $\varepsilon = 0,67-0,68$. Полученные данные позволяют производить расчеты эффективности теплоизоляционного покрытия «Тезолат» в реальных условиях использования с учетом конвективной составляющей.

Значения эффективной теплопроводности для различных температурных условий приведены в таблице 5, из которой следует, что эффективная теплопроводность теплоизоляционного покрытия «Тезолат» определенная на основе полученных данных составляет $\lambda_{эф} = 0,001-0,01$ Вт/мК.

Температура Покрытия, °С	Температура среды °С	$\lambda_{эф}$, Вт/мК
0	-20	0,001
50	0	0,005
100	20	0,01

Выводы

Проведены испытания керамического теплоизоляционного покрытия «Тезолат» в условиях вакуума. В результате показано, что использование покрытия позволило сократить потери тепловой энергии отагревателя на 15-20%.

Степень черноты покрытия составляет $\varepsilon = 0,67-0,68$, теплопроводность покрытия составляет $\lambda=0,3-0,34$ Вт/мК. Полученные данные позволяют производить расчеты эффективности теплоизоляционного покрытия «Тезолат» в реальных условиях использования с учетом конвективной составляющей.

Значения эффективной теплопроводности для различных температурных условий показала, что эффективная теплопроводность теплоизоляционного покрытия «Тезолат», определенная на основе полученных данных составляет $\lambda_{эф} = 0,001-0,01$ Вт/мК.

Заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Национальной металлургической академии Украины,
д.т.н., проф.

Губинский М.В.