



**Часть 1 Экспериментальные методы  
теплообмена**

## 1 Измерение теплопроводности веществ

### 1.1 Измерение теплопроводности воздуха методом нагретой нити

#### **Цель эксперимента**

Целью лабораторной работы является измерение коэффициента теплопроводности воздуха в интервале температур от 50°C до 300°C при атмосферном давлении.

Предварительное представление о порядке величины и характере температурной зависимости коэффициента теплопроводности газа можно получить из элементарной газокинетической теории, согласно которой

$$\lambda \approx \rho c_v w l, \quad (1.1)$$

где  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, и  $c_v$ , Дж/(кг К), – плотность и теплоемкость газа,  $w$ , м/с, – скорость теплового движения молекул, т.е. примерно скорость звука,  $l$ , м – длина свободного пробега молекул, обратно пропорциональная плотности газа и эффективному сечению столкновений молекул. Для воздуха при нормальных условиях после подстановок числовых значений величин в порядке их следования получим:

$$\lambda \approx \rho c_v w l \approx 1 \cdot 10^3 \cdot 300 \cdot 10^{-7} \approx 10^{-2} \text{ Вт/(м К)}.$$

Учитывая, что

$$w \propto \sqrt{T},$$

температурную зависимость коэффициента теплопроводности в соответствии с формулой (1.1) можно представить в виде

$$\lambda(T) = \text{const} \sqrt{T},$$

где постоянная  $\text{const}$  зависит только от рода газа. Важным выводом элементарной теории является также независимость теплопроводности газа от давления, благодаря тому что произведение  $\rho l$  – постоянная величина.

Итак, в соответствии с элементарной газокинетической теорией, теплопроводность воздуха есть величина порядка 10<sup>-2</sup> Вт/(мК), существенно увеличивающаяся с ростом температуры.

Для проведения инженерных расчетов требуются точные и надежные данные по теплофизическим свойствам веществ, в том числе и по коэффициенту теплопроводности различных теплоносителей и конструкционных материалов. Ввиду приближенного характера как использованной выше элементарной газокинетической, так и более

сложных теоретических моделей, главная роль в определении свойств веществ принадлежит эксперименту.

Одним из основных способов измерения теплопроводности газов является *метод нагретой нити*.

### **Методика эксперимента и опытная установка**

Опытная установка (Рис. 1.1) состоит из массивного медного цилиндрического блока с аксиальным сверлением, в котором строго по оси натянута платиновая нить, нагреваемая электрическим током. Выделяющаяся Джоулева теплота переносится посредством теплопроводности (и частично излучением) через цилиндрический слой воздуха к медному блоку. Влияние свободной конвекции исключается выбором достаточно малого диаметра сверления и ограничением максимальной разности температур.

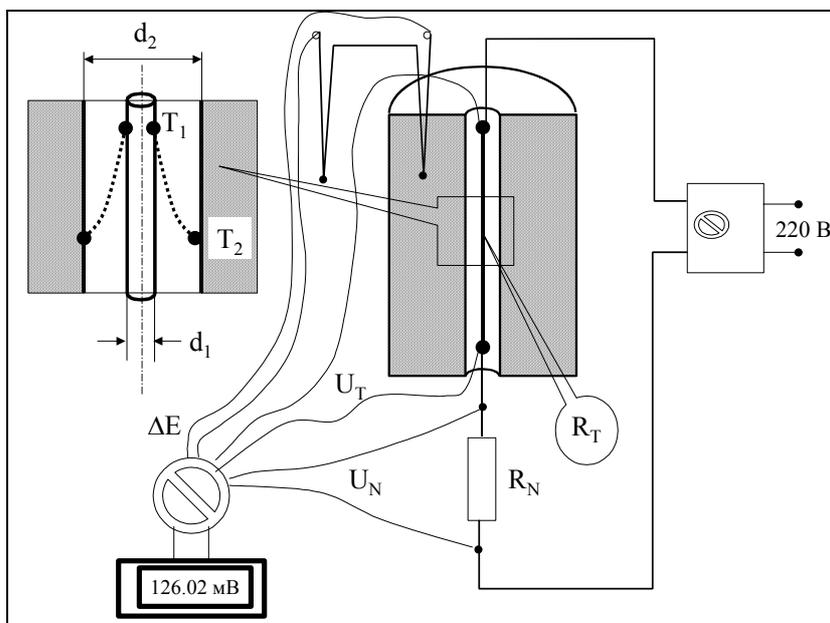


Рис. 1.1. Схема опытной установки

Если *зафиксировать* какое-либо значение силы тока, то температура платиновой нити  $T_1$  установится на *определенном уровне*, зависящем от теплопроводности того вещества, которое заполняет цилиндрическую прослойку между нагретой нитью и медным блоком. Измеряя температуру  $T_1$ , мы можем судить о теплопроводности вещества в зазоре. В этом состоит основная идея эксперимента.

Для установления строгой количественной связи между измеряемыми величинами и искомым значением теплопроводности необходима *теория экспериментального метода*.

Теория теплопроводности дает для рассматриваемой задачи о *стационарной теплопроводности цилиндрического слоя* следующую формулу:

$$q_l = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi\lambda_{cp}} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (1.2)$$

где  $\lambda_{cp}$ , Вт/(м·К) – среднеинтегральное значение коэффициента теплопроводности воздуха

$$\lambda_{cp} \equiv \frac{\int_{T_2}^{T_1} \lambda(t) dt}{T_1 - T_2}; \quad (1.3)$$

$\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности как функция температуры;  $q_l$ , Вт/м – линейная плотность теплового потока;  $T_1$ , К – температура нагретой нити;  $T_2$ , К – температура блока;  $d_2$ , мм – диаметр отверстия в блоке, т.е. внешний диаметр цилиндрического слоя воздуха;  $d_1$  мм – диаметр нити, т.е. внутренний диаметр цилиндрического слоя воздуха. Формула (1.2) может быть непосредственно применена для вычисления  $\lambda_{cp}$ , если в опыте измерены  $q_l$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ . Такой способ определения коэффициента теплопроводности в эксперименте мы будем называть *методом цилиндрического слоя*.

Более совершенным является экспериментальный метод с *термостатированной холодной стенкой*,  $T_2 = \text{const}$ . Формулу (1.2) можно переписать в виде, более удобном для обработки эксперимента, подставив (1.3) в (1.2):

$$\int_{T_2}^{T_1} \lambda(t) dt = \left( \frac{1}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) q_l. \quad (1.4)$$

Эта запись содержит подсказку для установления полезной связи между измеряемыми величинами ( $q_l$ ,  $T_1$ ) и искомыми значениями коэффициента теплопроводности  $\lambda$ . Пусть температура  $T_2$  (нижний предел интегрирования) *фиксирована*. Тогда, дифференцируя уравнение (1.4) по  $T_1$ , получают следующую основную расчетную формулу *метода нагретой нити*:

$$\lambda(T_1) = \left( \frac{1}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) \frac{dq_l}{dT_1}; \quad T_2 = \text{const}. \quad (1.5)$$

Заметим, что в левой части (1.4) производится *дифференцирование интеграла по верхнему пределу*; при дифференцировании правой части следует учесть, что величина в скобке есть *константа* прибора.

Чтобы применить формулу (1.5) для экспериментального метода, необходимо обеспечить в эксперименте условие постоянства температуры  $T_2$ . Именно для этой цели в качестве «приемника» теплового потока используется массивный медный блок, благодаря высокой теплопроводности и большой теплоемкости которого температура его внутренней поверхности  $T_2$  сохраняется в эксперименте практически неизменной.

**Таким образом, для экспериментального определения коэффициента теплопроводности необходимо:**

1. измерить в эксперименте ряд значений  $(T_1, q_l)$ ,
2. аппроксимировать связь между величинами  $q_l$  и  $T_1$  подходящей аналитической зависимостью  $q_l(T_1)$ , например, полиномиальной,
3. продифференцировать зависимость  $q_l(T_1)$  и, используя соотношение (1.5), получить искомую формулу для коэффициента теплопроводности.

Из (1.5) следует, что если  $q_l(T_1)$  аппроксимируется *линейной* зависимостью, то коэффициент теплопроводности будет *постоянной* величиной, не зависящей от температуры. Поскольку теория предсказывает существенную зависимость от температуры, необходимо начать с *квадратичной* аппроксимации для  $q_l(T_1)$ :

$$q_l(T_1) = a + b \cdot T_1 + c \cdot T_1^2; \quad \frac{d}{dT_1} q_l(T_1) = b + 2c \cdot T_1. \quad (1.6)$$

Если *квадратичная* аппроксимация окажется удовлетворительной, то в соответствии с формулой (1.5) получится *линейная* температурная зависимость для коэффициента теплопроводности:

$$\lambda(T_1) = \left( \frac{1}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) \frac{dq_l}{dT_1} = \left( \frac{1}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) (b + 2c \cdot T_1). \quad (1.7)$$

Замечательное свойство метода состоит в том, что определяется сразу истинное значение коэффициента теплопроводности  $\lambda(T_1)$  при контролируемой температуре  $T_1$ . В методе цилиндрического слоя, основанном непосредственно на формуле (1.2), можно измерить только среднеинтегральное значение  $\lambda_{\text{ср}}$  в интервале температур  $(T_2, T_1)$ .

### **Измерительная схема**

Температура нити  $T_1$  измеряется методом термометра сопротивления, в качестве которого используется сама платиновая нить. Применяется так называемая *четырёхпроводная* схема включения (два токовых и два потенциальных подвода), чтобы исключить влияние контактных сопротивлений (Рис. 1.1).

Нормальное (эталонное) сопротивление  $R_N$  включено последовательно с нитью – термометром сопротивления и используется для определения силы тока  $I$  в цепи,  $I = U_N / R_N$ .

Разность температур между блоком и окружающей средой контролируется по ЭДС дифференциальной хромель-алюмелевой термопары ( $\Delta E$ , мВ). Комнатная температура измеряется образцовым ртутным термометром.

Падение напряжения на нити  $U_T$  (позиция 10 на переключателе) и на нормальном сопротивлении  $U_N$  (позиция 11), а также величина  $\Delta E$  (позиция 12) определяются цифровым вольтметром высокого класса точности.

### **Проведение эксперимента**

Следует запланировать измерения ориентировочно при 10 различных режимах, задаваемых переключателем напряжения на блоке питания. Учесть, что максимальная допустимая температура нити (приблизительно 300°C) на данной установке соответствует значению  $U_T \sim 1$  В. Измерения необходимо производить при *стационарном* режиме. Время установления режима после изменения нагрузки не превышает 1 мин.

При проведении эксперимента необходимо:

- 1) установить с помощью переключателя напряжения на блоке питания очередной температурный режим, характеризующийся тепловыделением  $Q$  и температурой нити  $T_1$ ; выждать примерно 1 мин для установления стационарного режима;
- 2) измерить падение напряжения на платиновой нити  $U_T$  мВ (позиция 10 на переключателе);
- 3) измерить падение напряжения на нормальном сопротивлении  $U_N$  мВ (позиция 11 на переключателе);
- 4) измерить термоЭДС дифференциальной термопары  $\Delta E$  мВ (позиция 12 на переключателе) для определения избыточной температуры блока по отношению к окружающей среде;
- 5) если необходимое число опытных точек получено, измерить  $t_{\text{комн}}$  °С ртутным термометром и закончить эксперимент, иначе идти к п. 1.

Протокол измерений оформить как таблицу с тремя колонками для  $U_T$ ,  $U_N$ ,  $\Delta E$ .

### Первичная обработка данных

Обработку опытных данных из-за большого объема вычислений рекомендуется проводить в математическом пакете Mathcad. Полученный на предыдущем этапе работы массив экспериментальных данных следует представить в табличной форме, например, с помощью объекта Mathcad Data Table (Таблица данных). Для этого необходимо выбрать пункт меню Insert и далее Data, Table. Получившейся таблице присваивают имя массива  $Ut\_Un\_dE$  и вводят вручную данные из протокола наблюдений (Рис. 1.2). В примере заполнена только одна строка, но всего их будет столько, сколько температурных режимов зафиксировано при проведении опытов (обычно десять режимов). В конце приведенного Mathcad-фрагмента показано, как извлечь из таблицы отдельные столбцы, такие как вектор  $Ut$ , элементы которого состоят из значений падения напряжения, измеренного на платиновой нити. Множитель 0.001 переводит показания прибора в вольты. Эти векторы (одномерные массивы данных) будут участвовать в дальнейшей обработке (см. ниже список из семи пунктов).

	Ut mV	Un mV	dE mV
$Ut\_Un\_dE :=$	0	1	2
0	58.71	18.8	0.012

$Ut := Ut\_Un\_dE^{(0)} \cdot 0.001$    
 $Un := Ut\_Un\_dE^{(1)} \cdot 0.001$    
 $dE := Ut\_Un\_dE^{(2)}$

Рис. 1.2. Табличное представление опытных данных

Для каждого температурного режима следует:

1. Определить температуру блока  $T_2$ , К,

$$T_2 = t_{комн} + k_{XA} \Delta E + 273.15,$$

где  $k_{XA} = 24.45$  град/мВ – наклон тарировочной кривой для хромель-алюмелевой термопары:

$$\Delta t = k_{XA} \cdot \Delta E;$$

$\Delta E$ , мВ – показания дифференциальной термопары, контролирующей разность температур «медный блок–окружающая среда». На рассматриваемом этапе первичной обработки данных температура блока  $T_2$  понадобится для вычисления поправки на радиационный тепловой поток.

2. Вычислить силу тока через нить  $I$ , А,

$$I = \frac{U_N}{R_N},$$

где  $R_N = 0.1$  Ом.

3. Вычислить сопротивление нити  $R_T$ , Ом,

$$R_T = \frac{U_T}{I}$$

и величину

$$\tilde{R}_T = \frac{R_T}{R_0} - 1,$$

где  $R_0 = 0.28736$  Ом – сопротивление платиновой нити при  $0^\circ\text{C}$ .

4. Определить температуру нити  $T_1$ , К, по градуировочной зависимости для платинового термометра сопротивления

$$T_1 = 273.15 + 252.0 \cdot \tilde{R}_T \frac{2}{1 + \sqrt{1 - 0.1485 \cdot \tilde{R}_T}}$$

5. Вычислить Джоулево тепловыделение в расчете на единицу длины нити, или, что то же самое, линейную плотность полного теплового потока  $q_l$ , Вт/м,

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{I \cdot U_T}{l},$$

где  $l = 81.5$  мм – длина нити.

6. Вычислить радиационную составляющую теплового потока  $q_{l,R}$ , Вт/м,

$$q_{l,R} = \varepsilon c_0 (T_1^4 - T_2^4) \pi d_1,$$

где

$c_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}$ , Вт/( $\text{м}^2\text{К}^4$ ) – константа Стефана–Больцмана;

$\varepsilon = (0.00013T_1 - 0.0025)$  – степень черноты платиновой нити;

$d_1 = 0.189$  мм – диаметр нити.

7. Вычислить кондуктивную (теплопроводностную) составляющую теплового потока  $q_{l,\lambda}$ , Вт/м:

$$q_{l,\lambda} = q_l - q_{l,R}$$

Эти вычисления нетрудно запрограммировать в среде Mathcad (Рис. 1.3). Главным результатом первичной обработки данных будут два связанных одномерных массива:

- температура нити  $T_1$  и

- линейная плотность теплового потока через испытуемый цилиндрический слой воздуха  $q_{L\lambda\_exper}$  (в обозначениях Mathcad-программы).

Массив  $T1$  распечатан только как иллюстрация; в конкретном эксперименте данные будут другими – они получатся из первичной таблицы протокола наблюдений (Рис. 1.2) после обработки программой Res.

$Rn := 0.1$      $D2 := 0.0025$      $D1 := 0.000189$      $L := 0.0815$      $t\_room := 20$   
 $\varepsilon(T) := 0.00013 \cdot T - 0.0025$      $Rt0 := 0.28736$      $k_{ChrAl} := 24.45$

$$Res := \left[ \begin{array}{l} \left( Rt \leftarrow \frac{Ut}{Un} \cdot Rn \right) \left( dRt \leftarrow \frac{Rt}{Rt0} - 1 \right) \\ \left( T1 \leftarrow 273.15 + 252.0 \cdot \left( \frac{dRt}{1 + \sqrt{1 - 0.1485 \cdot dRt}} \right)^2 \right) \left( T2 \leftarrow t\_room + k_{ChrAl} \cdot dE + 273.15 \right) \\ \left( qL \leftarrow \frac{(Un \cdot Ut)}{Rn \cdot L} \right) \left( qLrad \leftarrow \left[ \varepsilon(T1) \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot D1 \cdot \left( T1^4 - T2^4 \right) \right] \right) \\ qL\lambda \leftarrow qL - qLrad \\ \left( T1 \quad T2 \quad qL\lambda \quad \max \left( \frac{qLrad}{qL} \right) \right)^T \end{array} \right]$$

$T1 := Res_0$      $T2 := Res_1$      $qL\lambda\_exper := Res_2$      $Radiation\_Contribution := Res_3$

	0
0	295.08076
1	300.99587
2	310.88263
3	325.87329
4	345.82351
5	371.33343
6	404.18715
7	443.98201
8	492.40656
9	547.98563

Рис. 1.3. Обработка опытных данных в Mathcad

### Уравнение регрессии для экспериментальной зависимости «тепловой поток—температура нити»

Аппроксимируем теперь полученную выше в табличной форме зависимость между температурой нити и тепловым потоком посредством *квадратичного полинома*, применив для этой цели встроенную функцию Mathcad *linfit* (Рис. 1.4). В качестве аргументов функции *linfit* выступают массивы (векторы) значений  $T1$  и  $q_{L\lambda\_exper}$ , полученные выше на этапе первичной обработки данных, а также набор функций  $Fq$ , задаваемых пользователем. Линейная комбинация функций  $Fq$ , т.е. полином второй степени в нашем случае, с набором коэффициентов  $Sq$  образует искомую аппроксимацию  $q_{L\lambda\_fit}(T)$  (Рис. 1.5). Коэффициенты  $Sq$  вычисляются при обращении к встроенной функции *linfit*, реализующей обработку данных методом наименьших квадратов.

Если в качестве аргумента функции  $qL\lambda\_fit(T)$  указать одномерный массив  $T1$  экспериментальных значений температуры нити, то в результате получится одномерный массив *сглаженных* значений теплового потока  $qL\lambda\_fitting$ . Оператор *векторизации* (стрелка сверху) предписывает, чтобы действия выполнялись поэлементно, над каждым элементом массива  $T1$ .

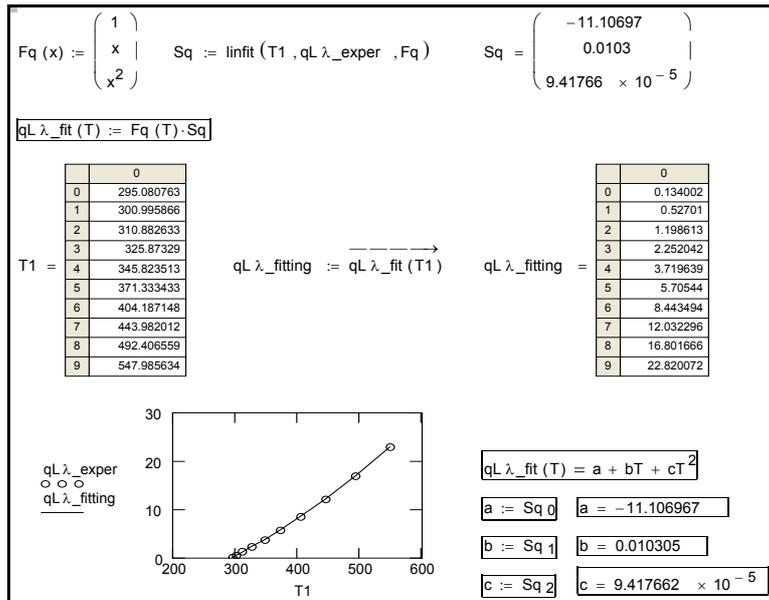


Рис. 1.4. Аппроксимация опытных данных «линейная плотность теплового потока– температура нити»

$Fq(T)_0 \rightarrow 1$	$Fq(T)_1 \rightarrow T$	$Fq(T)_2 \rightarrow T^2$
$Sq_0 = -11.116954$	$Sq_1 = 0.010367$	$Sq_2 = 9.355301 \times 10^{-5}$
$qL\lambda\_fit(T) := Sq_0 \cdot Fq(T)_0 + Sq_1 \cdot Fq(T)_1 + Sq_2 \cdot Fq(T)_2$		

Рис. 1.5. Развернутая запись для аппроксимирующего полинома

Массивы  $T1$  и  $qL\lambda\_fitting$  распечатаны для пояснения их структуры (Рис. 1.4). Они дают также представление о примерных значениях измеряемых величин, но в конкретном эксперименте данные будут другими – они получатся из первичной таблицы протокола наблюдений (Рис. 1.2) после обработки программой **Res** (Рис. 1.3).

Сопоставление непосредственно измеренных величин теплового потока  $qL\lambda\_exper$  и вычисленных по аппроксимирующей формуле  $qL\lambda\_fitting$  показано на графике (Рис. 1.4). Аппроксимация параболой в примере

обработки оказалась удачной настолько, что при простом визуальном контроле отклонения опытных точек от аппроксимирующей кривой не заметны. Уравнение регрессии и коэффициенты полинома  $a$ ,  $b$ ,  $c$  выписаны еще раз как итог вычислений в Mathcad-программе (Рис. 1.4).

В отчете по лабораторной работе следует, руководствуясь приведенным примером, получить уравнение регрессии для зафиксированного в конкретном эксперименте набора данных и оценить качество аппроксимации не только визуально, но и количественно, как показано далее.

### **Уравнение для коэффициента теплопроводности**

Итак, на предыдущем этапе обработки опытных данных получена аппроксимация для зависимости теплового потока от температуры нити  $q_{\Lambda\_fit}(T)$ . Теперь можно воспользоваться основной формулой метода нагретой нити (1.7), чтобы получить эмпирическое выражение для коэффициента теплопроводности воздуха:

$$\lambda(T) = A(B + C \cdot T); \quad A = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1}; \quad B = b; \quad C = 2c. \quad (1.8)$$

Вычисления проведены в среде Mathcad (Рис. 1.6). Результаты эксперимента представлены в графической и табличной форме и сопоставлены с табличными (справочными) данными для воздуха.

Вычисления начинаются с записи уравнения (1.8). Рядом представлены стандартные справочные данные для теплопроводности воздуха в форме таблицы  $T_{\Lambda}$ , столбец которой с нулевым индексом <0> содержит абсолютную температуру, а столбец с индексом <1> – соответствующее значение коэффициента теплопроводности.

Далее таблица дополняется еще одним столбцом, в котором помещены значения коэффициента теплопроводности, полученные в нашем эксперименте; они вычислены по эмпирической формуле (1.8) при заданных значениях температуры. Сводная таблица  $T_{\Lambda\_exper}$  получается с помощью оператора Mathcad **augment** («расширение массива»).

На графике сопоставлены экспериментальные и табличные (справочные) значения. В исследовательской практике, такого рода сопоставления проводятся необязательно только с табличными, т.е. эталонными значениями, но и с данными других экспериментов, проведенных другими исследователями на других экспериментальных установках.

Из графика и вычислений видно, что имеется *небольшое* завышение опытных данных по сравнению с эталонными значениями, в пределах 3–5%.

В отчете о лабораторной работе следует провести аналогичные вычисления для конкретных экспериментальных данных, руководствуясь примером (Рис. 1.6). Следует также дать подробные комментарии к полученным результатам для коэффициента теплопроводности воздуха, описать характер температурной зависимости, указать диапазон температур

и соответствующих значений теплопроводности, обсудить возможные причины отклонения результатов от табличных значений.

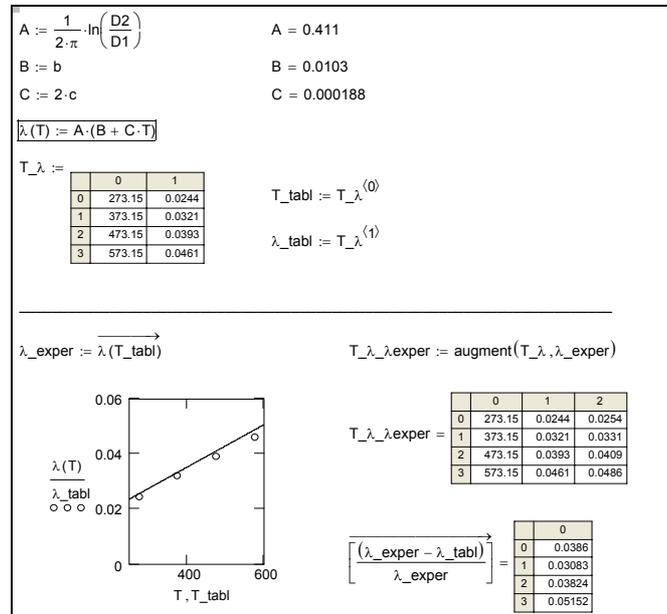


Рис. 1.6. Коэффициент теплопроводности воздуха

### Оценка ошибки эксперимента

Коэффициенты  $B$  и  $C$  в эмпирической формуле (1.8) определяются через коэффициенты уравнения регрессии (см. уравнения (1.6), (1.7) и (1.8)) и поэтому получают с некоторой *случайной ошибкой*. Эта ошибка зависит от качества аппроксимации  $q\lambda\_fit(T)$ . Ранее мы оценили визуально качество аппроксимации как очень хорошее. В пакете Mathcad можно получить также количественные оценки качества аппроксимации (Рис. 1.7). На графике представлено соотношение между сглаженными значениями  $q\lambda\_fitting$  и экспериментальными данными  $q\lambda\_exper$ , содержащими некоторый разброс. Если бы такого разброса не было, то мы получили бы просто прямую линию  $q\lambda\_exper = q\lambda\_fitting$  с наклоном 45 градусов. Встроенные статистические функции Mathcad  $corr$  и  $stderr$  вычисляют коэффициент корреляции и стандартное отклонение (среднее квадратичное отклонение). Видно, что коэффициент корреляции очень близок к предельному единичному значению, а стандартное отклонение мало по сравнению с самими значениями, имеющими порядок десяти.

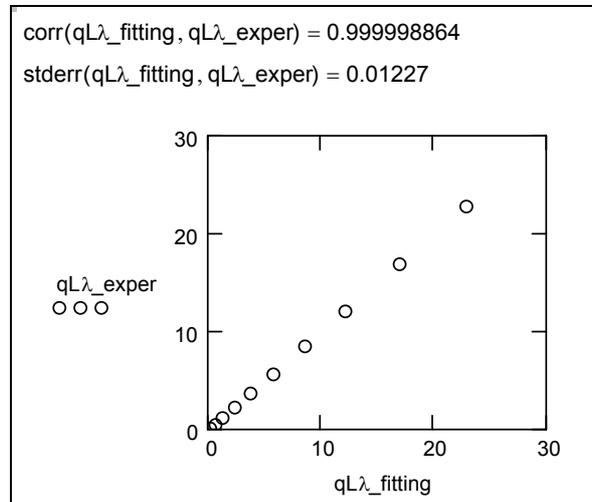


Рис. 1.7. Оценка качества аппроксимации данных

В специализированных математических пакетах для статистической обработки данных вместе с коэффициентами регрессии выводятся и их погрешности.

Если имеется доступ к статистическому пакету S-Plus Mathsoft, то можно создать в Mathcad файл, содержащий опытные данные (таблицу T1, qLλ\_exper), затем импортировать этот файл в S-Plus и получить уравнение регрессии, последовательно выбирая пункты меню Statistics, Regression, Nonlinear.

Отчет S-Plus выглядит следующим образом:

```

*** Nonlinear Regression Model ***

Formula: qL ~ a + b * T1 + c * T1^2

Parameters:
      Value          Std. Error
a  -1.11070 e+001    1.19376 e-001
b   1.03048 e-002     5.98252 e-004
c   9.41766 e-005     7.20852 e-007

Residual standard error: 0.0131189 on 7
degrees of freedom
  
```

На основе этих данных была проведена оценка случайной ошибки при измерении коэффициента теплопроводности (Рис. 1.8). Сопоставляя оценку случайной ошибки (примерно 1%) и отклонение от эталонных значений (3-5%), можно сделать вывод о существовании заметной систематической погрешности в несколько процентов. Источником

систематической ошибки являются погрешности в значениях геометрических параметров установки  $d_1, d_2, l$ , сопротивления платиновой нити  $R_0$  и т.д. Оценку максимальной расчетной ошибки эксперимента можно выполнить в порядке самостоятельного факультативного упражнения.

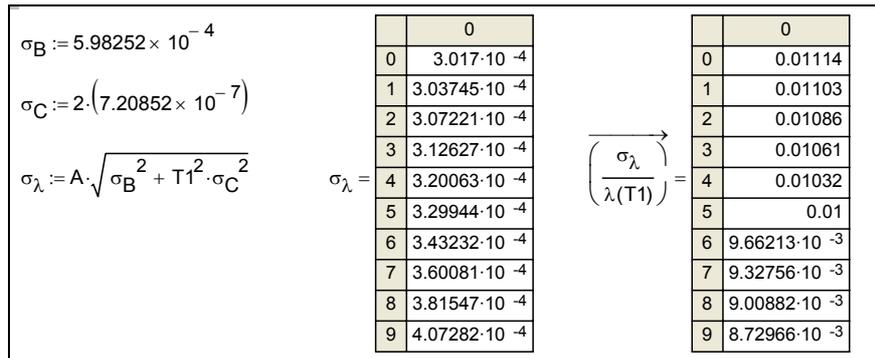


Рис. 1.8. Случайная ошибка эксперимента

Обязательными для отчета оценками погрешностей должны быть вычисления отклонений от табличных значений (Рис. 1.6 и оценка качества аппроксимации (Рис. 1.7).

### Обработка данных по методу цилиндрического слоя

В качестве факультативного упражнения можно применить также упрощенную процедуру обработки опытных данных, если для вычисления коэффициента теплопроводности воспользоваться непосредственно формулой (1.2), переписанной в следующем виде:

$$\lambda_{cp} = \left( \frac{1}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) \frac{q_l}{T_1 - T_2}, \quad (1.9)$$

где  $\lambda_{cp}$  – среднеинтегральное значение коэффициента теплопроводности воздуха в интервале температур от  $T_2$  до  $T_1$  (см. формулу (1.3)).

Непосредственно в таком виде результат бесполезен для практики, поскольку среднеинтегральное значение зависит от двух переменных,  $\lambda_{cp} = f(T_2, T_1)$ . Поэтому необходимо решить вопрос о том, к какому конкретному значению температуры из интервала  $(T_2, T_1)$  следует отнести полученное в эксперименте  $\lambda_{cp}$ . Если предположить априори, что в указанном интервале зависимость  $\lambda(T)$  линейная, то полученное значение коэффициента теплопроводности можно соотнести со *средней арифметической* температурой в цилиндрическом слое воздуха

$$T_m = \frac{T_2 + T_1}{2}. \quad (1.10)$$

Температуру  $T_m$  называют температурой отнесения.

Первичная обработка данных производится точно так же, как и в основном варианте. Вычисления можно выполнить в Mathcad (Рис. 1.3) или вручную. Напомним, что результатом первичной обработки данных будут два связанных одномерных массива: в обозначениях Mathcad-программы (Рис. 1.3) это температура нити  $T_1$  и линейная плотность теплового потока через испытуемый цилиндрический слой воздуха  $qL\lambda_{\text{exper}}$ .

Далее следует вычислить экспериментальные значения коэффициента теплопроводности  $\lambda_m$  и значения температуры отнесения  $T_m$  соответственно по формулам (1.9) и (1.10) (см. Рис. 1.9). Запись расчетных соотношений в Mathcad практически не отличается от обычной математической нотации. Оператор *векторизации* (стрелка сверху) предписывает, чтобы действия выполнялись поэлементно, над каждым элементом массивов  $qL\lambda_{\text{exper}}$ ,  $T_1$  и  $T_2$ . Как видно, не потребовалось никакого специального программирования, чтобы обработать данные в больших таблицах.

В таблице  $T_\lambda$  (Рис. 1.9) представлены стандартные справочные данные для теплопроводности воздуха: столбец с нулевым индексом  $\langle 0 \rangle$  содержит абсолютную температуру  $T_{\text{tabl}}$ , а столбец с индексом  $\langle 1 \rangle$  – соответствующее значение коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{tabl}}$ . На графике сопоставлены экспериментальные и табличные данные.

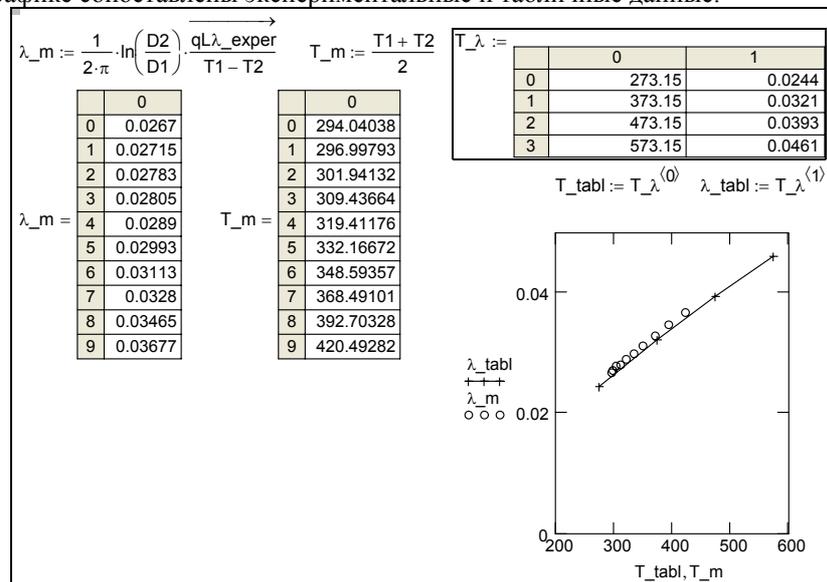


Рис. 1.9. Обработка данных по методу цилиндрического слоя

Подчеркнем, что данные в таблицах опытных данных  $\lambda_m$ ,  $T_m$  носят иллюстративный характер. В конкретном эксперименте результаты будут другими – они получатся из первичной таблицы протокола наблюдений (Рис. 1.2) после обработки данных, как описано выше.

*Методическое замечание.* Следует иметь в виду, что установка спроектирована для работы методом термостатированной холодной стенки (уравнение (1.5)). В основной методике достаточно обеспечить *постоянство* температуры блока, а в эксперименте с упрощенной обработкой методом цилиндрического слоя (уравнения (1.9), (1.10)) необходимо и *термостатировать*, и *точно измерять* эту температуру. Преимущество основного метода (уравнение (1.5)), измеряющего истинное, а не среднее значение коэффициента теплопроводности, может быть особенно важным для веществ с сильной и нелинейной температурной зависимостью, как это имеет место в области околоскритических или нестабильных состояний вещества или при криогенных температурах.

### **Отчет о работе**

Отчет должен содержать:

- Формулировку цели эксперимента
- Схему установки и краткое описание методики эксперимента
- Протокол наблюдений и обработки данных
- Сопоставление с табличными данными и оценку точности эксперимента
- Графическое представление результатов
- Краткую итоговую формулировку результатов эксперимента.

### **Контрольные вопросы**

- Определение понятия коэффициента теплопроводности
- Расчетное соотношение для теплового потока через цилиндрический слой с учетом температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Понятие среднеинтегрального коэффициента теплопроводности. Понятие температуры отнесения
- Основная формула метода нагретой нити, получаемая в предположении о постоянстве температуры  $T_2$
- Методика эксперимента: перечень измеряемых величин, способ определения температуры платиновой нити и линейной плотности теплового потока

- Уравнение регрессии для зависимости теплового потока от температуры нити
- Характер температурной зависимости по результатам эксперимента, эмпирическое уравнение для коэффициента теплопроводности, значения коэффициента теплопроводности воздуха
- Соотношение величин коэффициента теплопроводности воздуха с другими технически важными газами (водород, углекислый газ, водяной пар)
- Соотношение величин коэффициента теплопроводности воздуха с другими веществами в жидкой и твердой фазе (вода, пластики, керамические материалы, металлы)
- Оценка погрешности эксперимента

С теорией процессов теплопроводности, экспериментальными методами и практическими приложениями можно подробно ознакомиться по источникам, указанным далее в списке литературы.

Программу для обработки экспериментальных данных и пример расчета можно найти по ссылке:

[..\Mathcad\\_HMT\33\\_Experiment\Hot-wire Correlation\\_4\\_demo.mcd](..\Mathcad_HMT\33_Experiment\Hot-wire Correlation_4_demo.mcd)

## **2 Измерение коэффициента теплоотдачи**

### **2.1 Локальная теплоотдача при обтекании цилиндра**

### **3 Испытания теплообменников**

#### **3.1 Пароводяной теплообменник**

#### **3.2 Градирня**

