

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Московский физико-технический институт  
(государственный исследовательский университет)

Кафедра молекулярной физики

Лабораторная работа № 3  
по курсу: Основы химической физики

**ТЕРМОХИМИЯ**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТ СГОРАНИЯ**  
**ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

МОСКВА 2011

УДК

Составители:

Простов Валерий Николаевич

Зубцов Дмитрий Александрович

Зубцова Жанна Исхаковна

Яворский Владислав Антонович

Лабораторная работа по курсу: Основы химической физики. Термохимия.  
Определение теплот сгорания органических соединений / МФТИ. М. 2011, 16с.

В работе калориметрическим методом измеряют тепловые эффекты сгорания органических соединений и рассчитывают стандартные теплоты сгорания. Полученные величины используют для расчёта стандартных теплот образования исследованных веществ.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СПРАВКА

**Термохимия** – экспериментальный раздел химической термодинамики, в котором устанавливаются тепловые эффекты фазовых и химических превращений и величины теплоемкостей веществ.

Теплоемкости веществ в кристаллическом и газообразном состояниях можно рассчитать теоретически, но определить теплоемкости жидкостей, теплоты фазовых переходов и тепловые эффекты реакций можно только по экспериментальным данным.

**Тепловым эффектом реакции** называется количество тепла, которое выделяется (*экзотермическая реакция*) или поглощается (*эндотермическая реакция*) при неизменных  $V$  и  $T$  (изохорно-изотермической реакции  $Q_v$ ) или  $P$  и  $T$  (изобарно-изотермической реакции  $Q_p$ ) исходных веществ и продуктов реакции.

Выбор знаков для тепла и работы является условным. В термохимии будем считать положительными тепло, сообщаемое системе, и работу, произведенную системой. Для изохорно-изотермического процесса работа расширения равна нулю и уравнение первого закона термодинамики принимает вид

$$dQ_v = dU \quad \text{или} \quad Q_v = U_2 - U_1 = \Delta U, \quad (1)$$

а для изобарно-изотермической реакции можно записать

$$dQ_p = dU + PdV = d(U + PV) = dH \quad \text{или} \quad Q_p = H_2 - H_1 = \Delta H \quad (2)$$

В (1) и (2) индекс "1" относится к начальному (исходные вещества), а индекс "2" – к конечному (продукты реакции) состояниям системы.

Таким образом, тепловой эффект изохорно-изотермической реакции определяется изменением внутренней энергии системы  $\Delta U$ , а тепловой эффект изобарно-изотермической реакции – изменением энтальпии системы  $\Delta H$ . Напомним, что внутренняя энергия системы включает энергию теплового движения всех микрочастиц системы (молекул, атомов, ионов и т.д.) и энергию взаимодействия этих частиц. Поскольку внутренняя энергия и энтальпия являются функциями состояния, значения  $Q_v$  и  $Q_p$  однозначно определяются соответствующими начальными и конечными состояниями системы.

В 1840 году русским химиком **Г.И. Гессом** сформулирован закон: *тепловой эффект реакции, состоящей из нескольких промежуточных стадий, не зависит от этих промежуточных стадий или их последовательности, а полностью определяется начальными и конечными состояниями системы.*

В термохимических таблицах приводятся значения стандартных теплот образования веществ  $\Delta_f H_{298}^0$ . Стандартной теплотой образования называется тепловой эффект образования соединения в изобарно-изотермическом процессе при стандартных условиях ( $P = 1$  атм и  $T = 298$  К) из простых веществ в их наиболее устойчивые модификации. Теплоты образования

простых веществ в стандартных условиях ( $\text{H}_2(\text{г})$ ,  $\text{O}_2(\text{г})$ ,  $\text{N}_2(\text{г})$ ,  $\text{C}_{\text{графит}}$  и т.д.) приняты равными нулю. В таблицах приводятся и значения тепловых эффектов сгорания (энтальпий сгорания) веществ, обычно также в изобарно-изотермическом процессе при стандартных условиях. При этом имеется в виду, что осуществляется полное сгорание. Из закона Гесса можно сформулировать два полезных следствия:

1. Тепловой эффект реакции равен алгебраической сумме энтальпий образования продуктов реакции за вычетом суммы энтальпий образования исходных веществ, т.е.

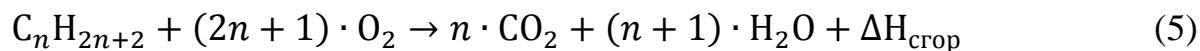
$$\Delta H = \sum_{\text{прод}} \Delta H_f - \sum_{\text{исх}} \Delta H_f \quad (3)$$

2. Тепловой эффект реакции равен алгебраической сумме энтальпий сгорания исходных веществ за вычетом суммы энтальпий сгорания продуктов реакции, т.е.

$$\Delta H = \sum_{\text{исх}} \Delta H_{\text{сгор}} - \sum_{\text{прод}} \Delta H_{\text{сгор}}. \quad (4)$$

Закон Гесса дает возможность устанавливать тепловые эффекты реакций, которые невозможно или трудно осуществить в экспериментальных условиях.

Измеряя теплоту сгорания органического соединения, можно определить теплоту его образования. Например, для углеводородов парафинового ряда имеем



Согласно (3), тепловой эффект этой реакции  $\Delta H_{\text{сгор}}$  можно представить как разность энтальпий образования продуктов сгорания  $n \cdot \text{CO}_2 + (n + 1) \cdot \text{H}_2\text{O}$  и исходных веществ. Единственной неизвестной величиной здесь будет энтальпия образования углеводорода.

Теплоты образования веществ дают возможность вычислить средние энергии связей в молекуле. Синтез соединения из простых веществ можно представить как процесс перевода их в одноатомные газы и образования из этих атомов соединения. Первый этап связан с затратой энергии на разрыв связей, а второй – с выделением энергии при образовании новых связей. Поэтому теплота образования газообразного вещества

$$\Delta H_f = \left[ \sum m_i \varepsilon_i + \sum k_i \cdot (Q_{\text{субл}})_i \right]_{\text{исх}} - \left[ \sum m_j \varepsilon_j \right]_{\text{прод}}, \quad (6)$$

где  $m_i$  и  $\varepsilon_i$  – число связей и их энергия в исходных веществах,

$m_j$  и  $\varepsilon_j$  – число связей и их энергия в продуктах,

$k_i$  и  $Q_i$  – число различных твердых элементов и их теплоты сублимации.

Следует, однако, подчеркнуть, что, используя средние энергии связей по формулам (6) и (3), можно проводить только приближенные, оценочные термодимические расчеты.

Основным экспериментальным методом термохимии является *калориметрия*. Чрезвычайно большое количество различных типов калориметров может быть отнесено к двум видам: калориметры с переменной температурой и калориметры с постоянной температурой. Все калориметры состоят из двух основных частей – калориметрической системы и калориметрической оболочки. Калориметрическая оболочка представляет собой элемент устройства, обеспечивающий заданные условия теплообмена с калориметрической системой. Калориметрическая оболочка может иметь постоянную или переменную температуру. В соответствии с этим обычно различают диатермический и адиабатный методы измерения тепла. В первом методе из-за различия в температурах калориметрических систем и оболочки всегда имеет место теплообмен между ними. Во втором, адиабатном, методе температура оболочки настолько точно следует за изменением температуры калориметрической системы, что теплообменом между калориметрической системой и оболочкой можно пренебречь.

Наряду с измерением собственно теплового эффекта прошедшей в калориметре реакции, калориметрия предполагает строгую химическую определенность системы до и после опыта, что достигается либо анализом продуктов реакции, либо гарантированным протеканием ее в одну сторону до конца. Последнему условию вполне удовлетворяют процессы сгорания органических соединений в избытке кислорода, которые приводят к высшим окислам элементов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и т.п.

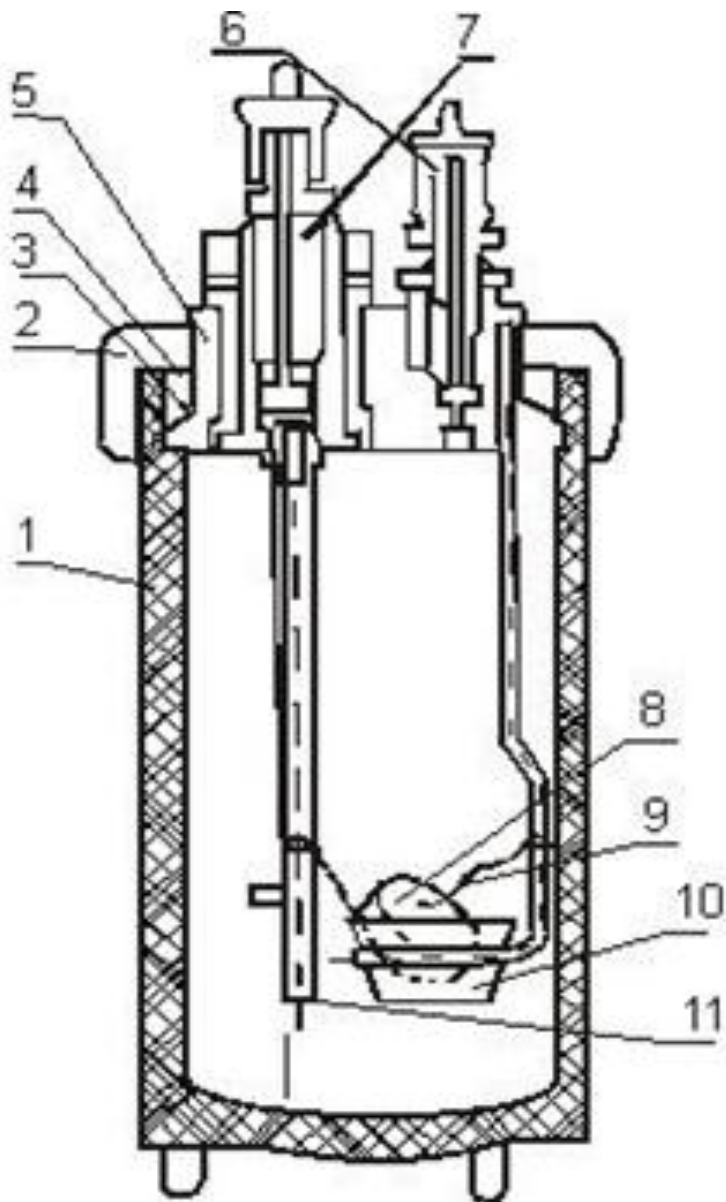
Экспериментально полученные теплоты сгорания веществ наиболее широко применяются для определения теплот образования.

## **МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ**

Определение теплот сгорания производят в калориметре переменной температуры с изотермической оболочкой. *Теплота сгорания* – это количество тепла, которое выделяется при полном сгорании 1 г (*удельная теплота сгорания*) или 1 моль (*молярная теплота сгорания*) вещества. Сгорание будет полным, когда углерод органического вещества превращается в диоксид углерода; водород – в жидкую воду; сера – в диоксид серы, а другие элементы, например азот, выделяется в свободном состоянии.

В качестве стандартного метода определения теплоёмкости калориметра (постоянной калориметра) используют метод сжигания в бомбе калориметра эталона – бензойной кислоты  $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$ , удельная теплота сгорания равна 26518 Дж/г. Через теплоту сгорания эталона определяется теплоты сгорания исследуемого вещества, указанного преподавателем, сжигая их в избытке кислорода в калориметрической бомбе. Для подготовки таблеток, используемых в бомбе, выбирают 4–5 навесок каждого из веществ (бензойной кислоты и исследуемого вещества) в диапазоне от 0,3 до 0,5 г, неравные между собой. Каждую навеску с помощью ручного пресса без чрезмерного усилия спрессовывают в таблетку, после чего полученные таблетки взвешивают на аналитических весах, и записывают в лабораторном журнале.

Для крепления каждой таблетки необходимы медная проволока и нитка, которые нарезают длиной по 10 см каждую и взвешивают на аналитических весах, после чего отмечают полученные данные в лабораторном журнале. По окончании взвешиваний необходимо подготовить бомбу, схема которой изображена на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Схема калориметрической бомбы

- 1 – стальной стакан,
- 2 – накидная гайка,
- 3 – прокладка,
- 4 – нажимная шайба,
- 5 – крышка,
- 6 – выходной вентиль и электрическая клемма корпуса,
- 7 – входной клапан и электрическая клемма изолированного токовода,
- 8 – таблетка для сжигания,
- 9 – проволока,
- 10 – чашка,
- 11 – трубка.

Каждую таблетку (рис. 1, п.8) обматывают ниткой (можно дополнительно сделать 2–3 витка запальной медной проволоки (рис. 1 п.9) вокруг таблетки) и помещают в чашку бомбы (рис. 1 п.10). Концы нити привязывают к запальной проволоке (или закручивают вокруг неё), а проволоку соединяют с каждым тоководом (как показано на рисунке к нижним частям тоководов рис. 1 п.6, рис. 1 п.7). При помощи тестера проверяют соединяет ли проволока два токоиода.

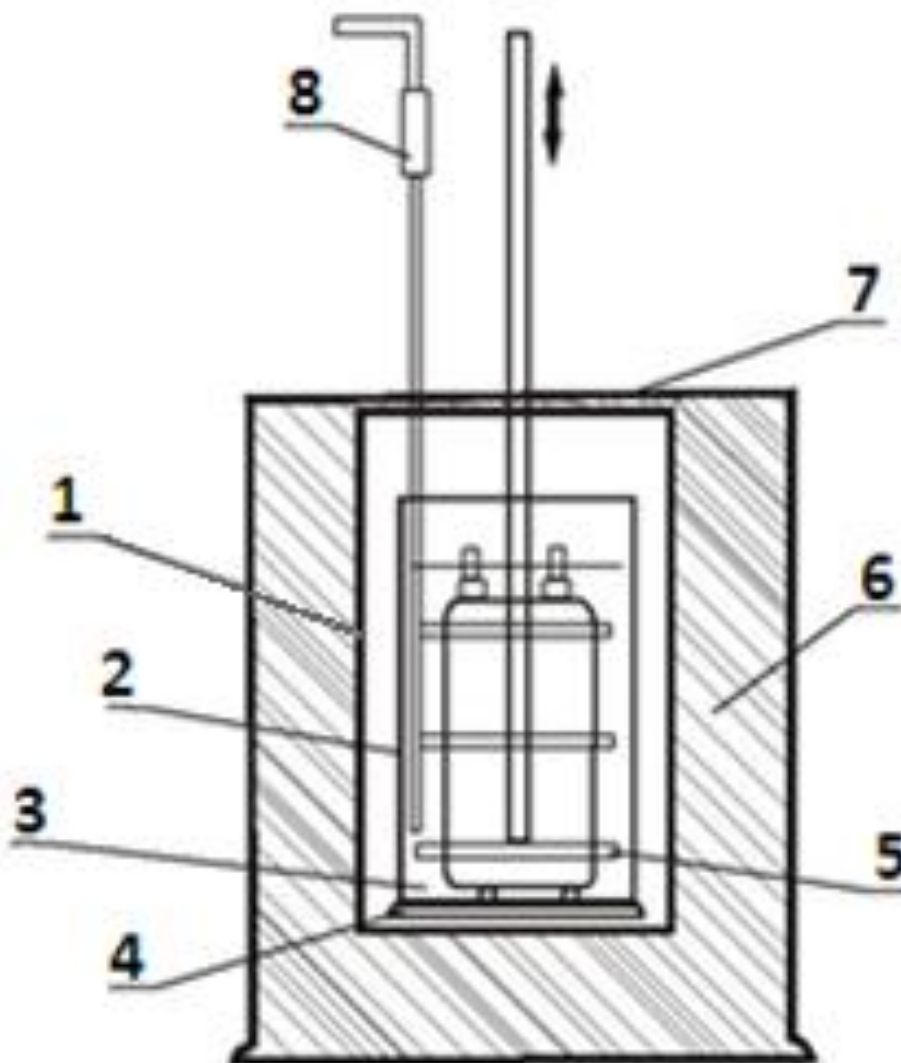
Чашку бомбы с таблеткой, закреплённой проволокой, помещают в стакан бомбы (рис. 1 п.1) объёмом 280 см<sup>3</sup>. При помощи накидной гайки (рис. 1 п.2), прокладки (рис. 1 п.3) и нажимной шайбы (рис. 1 п.4) на стакан (корпус) бомбы герметически крепится крышка бомбы (рис. 1 п.5). При закручивании крышки бомбы очень важно сделать это аккуратно, довести до упора, но не прилагать дополнительных усилий, так как в течении эксперимента крышка будет уплотнена давлением газов.

После этого приступают к наполнению бомбы кислородом. Для этого трубку, идущую от манометра, подсоединяют к расположенному на крышке бомбы входному вентилю (рис. 1 п.7) и руками закручивают штуцер трубки, не прилагая чрезмерных усилий. После этого выходной вентиль бомбы (рис. 1 п.6) открывают специальным ключом, имеющимся в комплекте к установке. Затем медленно открывают вентиль на подводящей магистрали от баллона с кислородом и аккуратно продувают бомбу в течение 10–15 секунд, при этом должен быть слышен звук выходящего из выходного вентиля газа. По истечению этого времени аккуратно закрывают выходной вентиль, до исчезновения звука выходящего газа, но без чрезмерных усилий. После закрытия выходного вентиля бомба заполняется кислородом до давления 15 атм. Перекрыв вентиль подачи кислорода, разъединяют трубку и бомбу и закрывают отверстия вентилях бомбы винтовыми пробками, являющимися одновременно клеммами (рис. 1 п.6) и (рис. 1 п.7). Если давление в бомбе превысит 25–30 атмосфер, то произойдёт сброс избыточного давления через обратный клапан входного вентиля. Для проверки герметичности бомбу помещают в калориметр, схема которого изображена на рисунке 2.

В калориметрический сосуд (рис.2.2) наливают дистиллированную воду (рис. 2.3) в количестве необходимом для того, чтобы крышка бомбы (рис. 2.4) находилась под водой, а выходные клеммы бомбы находились над водой. Температура воды должна быть на 2 градуса ниже комнатной  $T_{нач} = T_{комн} - 2$ , что обеспечивает при нагреве калориметрической системы во время опыта на 2–4 градуса минимальную поправку на теплообмен с калориметрической оболочкой. Температуру воды важно опускать до первоначального значения  $T_{нач}$ , после каждого эксперимента (каждого взрыва).

Погруженную в воду бомбу внимательно осматривают, на предмет травления кислорода, при обнаружении которого, необходимо вытащить бомбу, аккуратно стряхнув воду обратно в калориметрический сосуд, устранить травление и снова наполнить бомбу кислородом до 10–15 атмосфер, после чего можно снова опустить бомбу в воду для проверки. Если травления не обнаружено, нужно снова проверить температуру воды  $T_{нач}$ , и при необходимости охладить.

Калориметрический сосуд укрепляется таким образом, чтобы его соприкосновение с калориметрической оболочкой (рис. 2.1) было бы минимальным. Пространство между калориметрическим сосудом и оболочкой заполнено воздухом, являющимся плохим проводником тепла. Калориметрическая оболочка с калориметрическим сосудом расположена в термостате (рис. 2.6), заполненном дистиллированной водой. Температура в термостате устанавливается за счёт естественного теплообмена с окружающей средой.



**Рисунок 2.** Схема калориметра для определения теплот сгорания.

- 1 – калориметрическая оболочка,
- 2 – калориметрический сосуд,
- 3 – дистиллированная вода,
- 4 – калориметрическая бомба,
- 5 – вертикальная мешалка,
- 6 – термостат,
- 7 – крышка,
- 8 – термистор.

Проводят дополнительную проверку тестером, соединяет ли проволока два токовода. После чего к клеммам бомбы (рис. 1 п.6) и (рис. 1 п.7)



присоединяют токоведущие провода. Опускают в сосуд вертикальную мешалку (рис. 2.5) так, чтобы лопасти не задевали калориметрический сосуд и бомбу.

Тепло, выделяющееся в бомбе при сгорании вещества, передаётся воде в калориметрическом сосуде и фиксируется полупроводниковым термистором (рис. 2.8). Термистор представляет собой термопару, помещённую в защитный металлический чехол, в нижней части которого находится ртуть для теплового контакта термопары со стенкой, поэтому его следует держать в вертикальном положении на достаточном расстоянии от других частей калориметра и оберегать от ударов, в том числе и об мешалку. Зависимость сопротивления термистора от температуры описывается соотношением

$$R_T = R_0 e^{\frac{\beta}{T}} \quad (7)$$

но в небольшом температурном интервале зависимость  $R_T$  от  $T$  линейна. Данные о сопротивлении термистора передаются посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на вход компьютера для обработки специальным программным обеспечением.

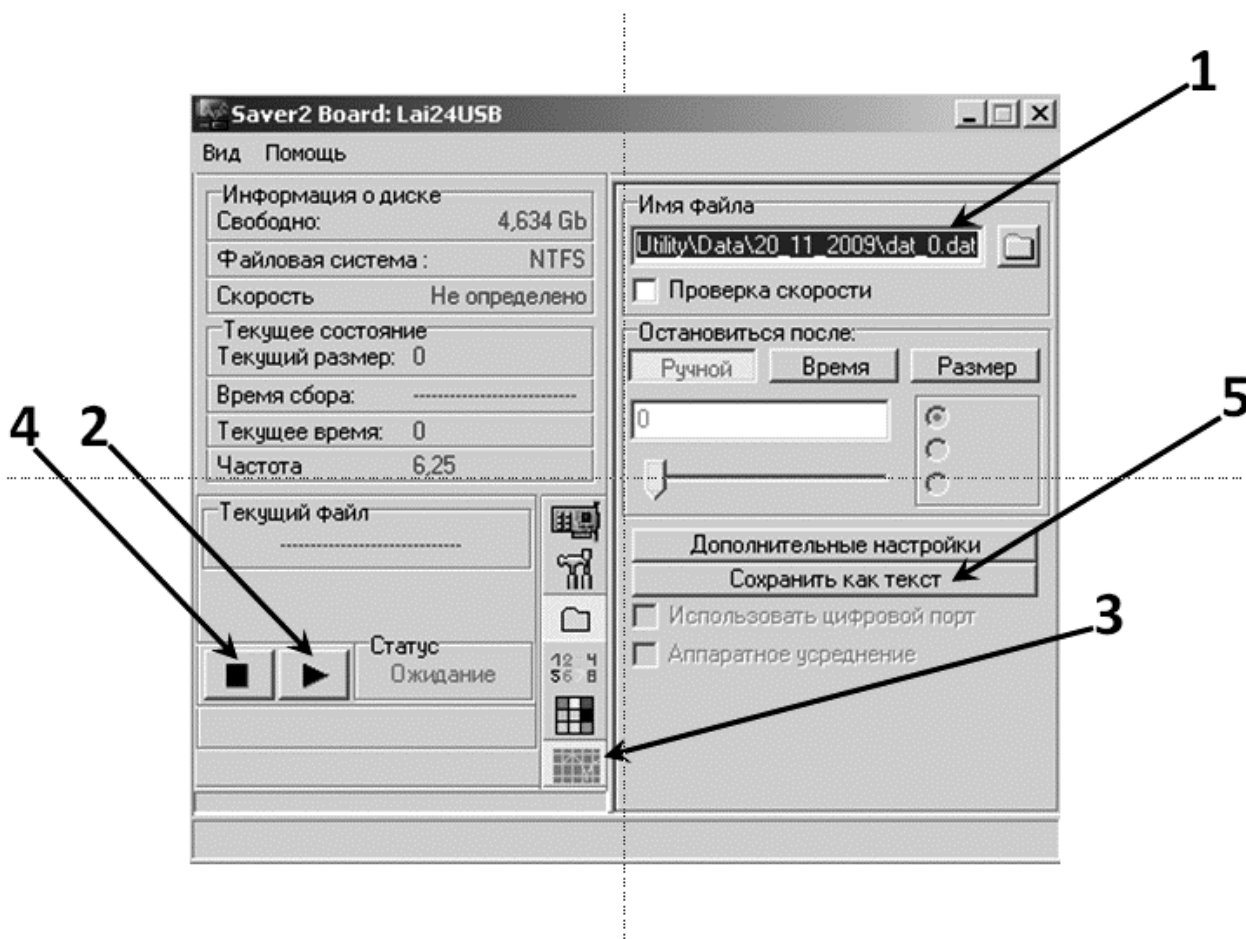
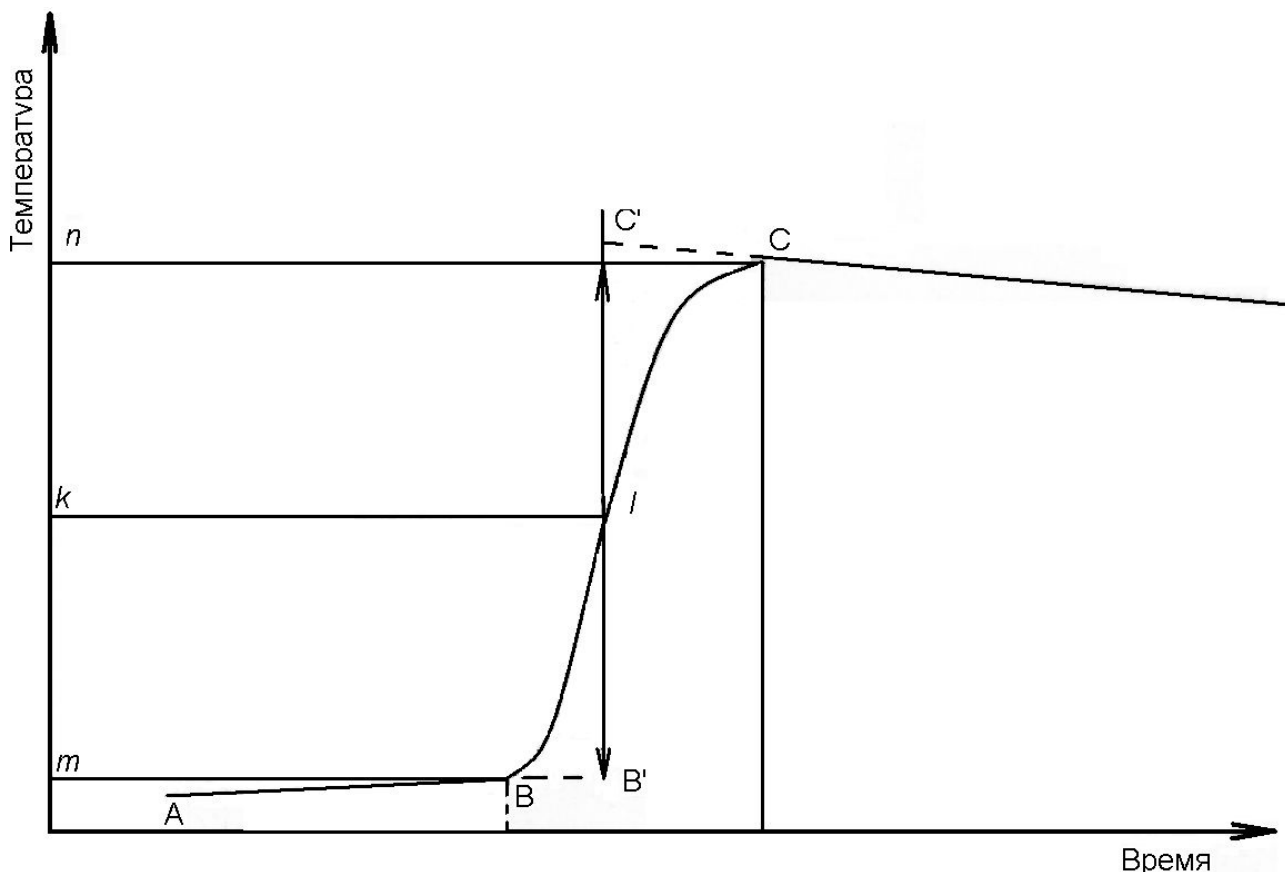


Рисунок 3. Основное окно программы **Saver2Board: Lai24USB**.

- 1 – поле «Имя файла»,
- 2 – кнопка «Запуск сбора»,
- 3 – кнопка «Показать сигнал»,
- 4 – кнопка «Остановка сбора»,
- 5 – кнопка «Сохранить как текст».

Калориметр закрывают крышками и запускают мешалку. Количество оборотов мешалки не должно меняться от эксперимента к эксперименту, кроме того желательно установить среднее количество оборотов, что соответствует равномерному перемешиванию. Необходимо некоторое время для выравнивания температуры во всех частях калориметрической системы.

На ЭВМ запускают программное обеспечение **Saver2Board: Lai24USB**. Для правильной работы программы указывают название файла, содержащее сокращённое название вещества и его массу в данном эксперименте (название вещества\_масса.dat), в разделе «Имя файла» с расширением \*.dat. Файл сохраняют в папке общей для группы студентов (рис. 3, п.1). Сбор данных запускают кнопкой «Запуск сбора» в панели «Статус» (рис. 3, п.2). После чего нажимают на кнопку «Показать сигнал» для отображения выходного сигнала с термистора (рис. 3, п.3). В течении минуты после запуска эксперимента наблюдают за температурой, этому соответствует линейный ход температуры системы во времени (*AB* рис. 4), если это не так, следует обратиться к преподавателю для устранения неисправности.



**Рисунок 4.** Изменение температуры во время калориметрического опыта.

Взрыв бомбы инициируют замыканием цепи тумблером, удерживая его во включённом состоянии в течении трёх секунд, от специального блока питания. Главный период эксперимента (*BC* рис. 4), соответствующий подъёму температуры за счёт теплоты сгорания, обычно длится не более 10 минут. Визуально контролируют кривую изменения температуры в течении всего

эксперимента, до выхода в стационар (после точки  $C$  рис. 4), после чего опыт прекращают.

Для остановки записи экспериментальных данных в программе нажимают кнопку «Остановка сбора» в панели «Статус» (рис. 3, п.4). Данные сохраняют, нажимая кнопку «Сохранить как текст» (рис. 3, п.5) и изменяя расширение файла на \*.txt, после чего нажимают кнопку «Сохранить». Важно здесь и далее проверять, чтобы программа автоматически не добавляла «0» в конце названия файла, то есть название \*0.txt недопустимы, из-за программной ошибки. Для проверки полученных данных сразу после сохранения открывают программу Microsoft Excel, в которой открывают только что созданный файл \*.txt, через меню «Файл» → «Открыть». Правильным форматом данных является наличие двух колонок, одна из которых отображает изменение времени в секундах, вторая – напряжения в вольтах (Соотношение между вольтами и кельвинами следует уточнять у преподавателя). Файл сохраняют с изменением его расширения на \*.xls.

Калориметрическую систему разбирают в обратном порядке сборки, сначала вытаскивают термистор и отводят его в сторону, выключают мешалку и снимают крышки термостата, поднимают мешалку, отключают токоведущие провода и извлекают бомбу, аккуратно стряхнув воду обратно в калориметрический сосуд. В калориметрический сосуд помещают охлаждающий змеевик, опускают и включают мешалку и, контролируя температуру термометром или через программу, предварительно её запустив, снижают температуру до исходного уровня  $T_{нач}$ . Калориметрический сосуд после этого готов к следующему опыту. Важно отметить, что незначительных погрешностей, связанных с изменением уровня воды в сосуде, неточностью выставления  $T_{нач}$ , можно избежать, чередуя эксперименты с бензойной кислотой с экспериментами с исследуемым веществом, начиная от крайних значений масс к средним значениям.

Извлечённую бомбу устанавливают в бомбодержатель, выходной ventиль бомбы (рис. 1 п.6) открывают специальным ключом, и выпускают газообразные продукты сгорания. Накидную гайку (рис. 1 п.2) аккуратно свинчивают и убеждаются в полном сгорании вещества. Если обнаружатся сажа и несгоревшие остатки, то данные эксперимента считаются недействительными и опыт нужно повторить с меньшим весом таблетки.

### УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Работа выполняется в точном соответствии с "Инструкцией по технике безопасности при работе в лаборатории химической физики".
2. Не допускается загрязнения смазочным маслом внутренней поверхности калориметрической бомбы.
3. Если сбрасывание избыточного давления кислорода не происходит ( $\geq 20$  атмосфер), необходимо перекрыть кран и обратиться к механику.

## ОБРАБОТКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения теплоемкости калориметра необходимо по данным об изменении температуры, полученным в экспериментах с бензойной кислотой, построить зависимость  $\Delta T$  от массы каждой таблетки. Проверить линейность зависимости и по тангенсу наклона (8) определить

$$K = \operatorname{tg} \alpha = \frac{26518 \cdot m_B + Q_{\Pi} \cdot m_{\Pi} + Q_H \cdot m_H}{\Delta T}, \quad (8)$$

где  $m_B$  – навеска бензойной кислоты в граммах,

$Q_{\Pi}$  и  $Q_H$  – теплоты сгорания запальной проволоки и нити (медной проволоки  $Q_{\Pi} = 2500$  Дж/г, для хлопчатобумажной нити  $Q_H = 17000$  Дж/г),

$m_{\Pi}$  и  $m_H$  – веса запальной проволоки и нити в граммах,

$\Delta T$  – подъем температуры калориметрической системы в главном периоде опыте, соответствующий отрезку  $B'C'$  на рисунке 3.

Для определения изменения температуры  $\Delta T$  точки  $B$  и  $C$  проектируют на ось ординат, находят середину отрезка  $mn$  и проводят линию  $kl$ . Через точку  $l$  проводят вертикаль. Линейные участки  $AB$  и  $CD$  экстраполируют до пересечения с вертикалью в точках  $B'$  и  $C'$ . Отрезок  $B'C'$  соответствует изменению температуры в опыте  $\Delta T$  с учётом поправки на теплообмен.

Для определения теплоты сгорания исследуемого вещества необходимо по данным об изменении температуры, полученным в экспериментах с этим веществом, построить зависимость  $\Delta T$  от массы каждой таблетки. Проверить линейность зависимости и по тангенсу наклона (8) определить тепловой эффект  $Q_V$  реакции сгорания исследуемого вещества

$$Q_V = \frac{K \Delta T - \sum Q_i \cdot m_i}{m'}, \quad (9)$$

где  $m'$  – навеска исследуемого вещества,

$\Delta T$  – подъем температуры в калориметрическом опыте.

Теплоту сгорания при постоянном давлении  $Q_p$ , которая равна изменению энтальпии в реакции (5), можно вычислить по формуле

$$Q_p = \Delta H_{\text{сгор}} = Q_V + \Delta n \cdot RT, \quad (10)$$

где  $\Delta n$  – разность числа молей газообразных продуктов реакции и исходных веществ.

Необходимо учитывать, что вода образуется при сгорании в бомбе в виде жидкости. Величины поправок приведения  $\Delta H_{\text{сгор}}$  к стандартным условиям должны быть оценены студентом самостоятельно. Теплоту образования  $\Delta_f H_{298}^0$  исследуемого вещества рассчитывают, используя вспомогательные величины, данные в конце описания.

Если условия проведения калориметрического опыта мало отличаются от тех условий, в которых проводилось определение теплоёмкости калориметра, то поправки к наблюдаемому повышению температуры  $\Delta T'$  не вводятся.

Результаты опытов представляют в виде графиков  $T = f(t)$  и таблиц для каждого из анализируемых веществ, с указанием названия, формулы и навески веществ, величины измеренных  $\Delta T$ , значения теплот сгорания в Дж/г и кДж/моль, а также вычисленные стандартные теплоты образования.

Расчёт энергий связи выполняется в соответствии с конкретным заданием, полученным от преподавателя.

**Таблица 1:** Таблица термохимических величин. Величины стандартных тепловых эффектов образования,  $H_{298}^0$  кДж/моль, неорганических, органических веществ, атомов, радикалов. Теплоты образования ионов даны для водного раствора

Вещество	$\Delta_f H_{298}^0$ кДж/моль	Вещество	$\Delta_f H_{298}^0$ кДж/моль	Вещество	$\Delta_f H_{298}^0$ кДж/моль
$Ag_{(p-p)}^+$	+106	$Cl_{(r)}$	+121	$K_{(p-p)}^+$	-251
алмаз	+1,90	$CO_{(r)}$	-110	$KCl_{(кр)}$	-436
$C_{(r)}$	+717	$CO_{2(r)}$	-394	$NH_{4(p-p)}$	-133
$CH_{(r)}$	+594	$F_{(r)}$	+79,5	$NO_{(r)}$	+91,0
$CH_{2(r)}$	+382	$Fe_{2(p-p)}^+$	-88,0	$NO_{2(r)}$	+34,0
$CH_{3(r)}$	+142	$Fe_{3(p-p)}^+$	-48,0	$O_{(r)}$	+249
$CH_{4(r)}$	-75,0	$H_{(r)}$	+218	$O_{3(r)}$	+142
$C_2H_{6(r)}$	-85,0	$HCl_{(r)}$	-92	$OH_{(p-p)}^-$	-230
$n-C_4H_{10(r)}$	-125	$HF_{(r)}$	-268	$S_{(r)}$	+277
$C_6H_6_{(r)}$	+83,0	$H_2O_{(r)}$	-242	$SO_{2(r)}$	-297
$CCl_{4(r)}$	-107	$H_2O_{(ж)}$	-286	$SO_{3(r)}$	-395
$CF_{4(ж)}$	-908	$K_{(r)}$	+90,0	$XeF_{2(r)}$	-113

**Таблица 2:** Усредненные энергии связей  $A - B$  кДж/моль,  $A$  и  $B$  могут быть группами атомов

H - H	436	C - C	348				
C - H	413	N - N	161				
N - H	391	O - O	139	C = C	682	C≡C	962
O - H	463	F - F	159	N = N	418	N≡N	941
F - H	563	Cl - Cl	243	O = O	498	C≡O	732
Cl - H	432	Br - Br	193				
Br - H	366	I - I	151				
I - H	299						

**Таблица 3:** Значение энтальпий сгорания исследуемых

Вещество	$\Delta_f H_{298}^0$ кДж/моль	Вещество	$\Delta_f H_{298}^0$ кДж/моль	Вещество	$\Delta_f H_{298}^0$ кДж/моль

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Рассчитать изменение энтальпии для перехода одного моля моноклинной серы в ромбическую (этот процесс слишком медленный для непосредственного калориметрического измерения). Энтальпия сгорания равна  $-296,9$  кДж/моль для моноклинной серы и  $-296,6$  кДж/моль для ромбической.
2. Пользуясь данными таблицы 1, рассчитать энтальпию сгорания при  $25^\circ\text{C}$  до  $\text{H}_2\text{O}(\text{ж})$  и  $\text{CO}_2$  следующих веществ: а) метана ( $\text{CH}_4$ ), б) н-бутана (н- $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), в) бензола ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ).
3. Для ацетона  $(\text{CH}_3)_2\text{CO}(\text{ж})$   $\Delta H_f^0_{298} = -248$  кДж/моль. Рассчитать теплоту сгорания  $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$  при постоянном давлении. Определить количество теплоты, выделяющееся при сжигании 2 г ацетона под давлением в закрытой бомбе при 298 К.
4. Из данных таблицы 1 рассчитайте энергию связи в молекулах  $\text{HCl}$  и  $\text{HF}$ .
5. Сформулируйте правило расчёта энтальпии реакций на основании энергий связи атомов в молекулах, участвующих в реакции. Для какого типа реакций этот способ применим?
6. Вычислите теплоты сгорания исследованных соединений в атомарном кислороде и в озоне. Сравните результаты с экспериментально измеренными в атмосфере молекулярного кислорода.
7. Рассчитать максимальную массу таблетки бензойной кислоты, которая полностью сгорит в данной установке.
8. Рассчитать максимальную температуру газов после полного сгорания таблетки бензойной кислоты массой 0,5 г.
9. Какую погрешность вносит зависимость  $\Delta_r H$  от температуры?
10. Опишите процесс горения твердого тела (или почему образуется сажа).
11. Оцените характерное время перехода тепла через стенки бомбы в воду.
12. Почему погрешность для  $\Delta_r H$  больше, чем для  $\Delta H_{\text{сгор}}$ ?
13. Посчитать  $K_p$  для комнатной и максимальной температуры газа внутри бомбы для подтверждения того, что реакция идет в 1 сторону.

## Список литературы

1. Я.И.Герасимов и др. Курс физической химии. Т.1. М.: Химия,1969, С54-74.
2. Ф.Даниэльс, Р.Олбери. Физическая химия. М.:Мир,1978, С31-41.