

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ГАЗАХ.

Передача тепла в газах происходит в основном благодаря двум процессам – конвекции и теплопроводности.

Конвекция - образование макроскопических потоков в газовой (или жидкой) среде - возникает, если нагретое тело находится внизу, а холодное, к которому передается тепло, наверху, и, кроме того, давление газа и расстояние между телами достаточно велики. Эти условия благоприятствуют возникновению интенсивной циркуляции газа, которая практически не поддается количественному теоретическому описанию. По абсолютной величине количество тепла, переносимое из-за конвекции, может быть значительно больше, чем энергия, передаваемая за счет теплопроводности. Однако с понижением давления газа роль конвекции в передаче тепла уменьшается.

Теплопроводность - непосредственная передача энергии теплового движения между имеющими разную температуру объемами вещества за счет взаимодействия их молекул. В газах это взаимодействие осуществляется молекулами, беспорядочно перелетающими в ту или в другую сторону через границу раздела между объемами и передающими избыточную кинетическую энергию при столкновениях; в конденсированных (твёрдых и жидких) телах более интенсивные колебания молекул одного объема раскачивают соседние с ними молекулы другого объема.

Собственно теплопроводностью называют молекулярный теплообмен в условиях, когда градиенты температуры не слишком велики (или плотность среды не слишком мала), так что среду можно разбить на "макроскопически бесконечно малые" объемы dV - настолько малые, что разности температур dT между соседними объемами очень малы по сравнению с общими разностями температур между участвующими в теплообмене телами, но настолько большие, что каждый из них содержит очень большое число молекул. В этом случае тепло передается "от точки к точке", то есть от одного макроскопически малого объема dV к соседнему, подобно тому, как течёт сплошная среда (жидкость или газ). Точно так же, как и при описании движения жидкости полезно вводить вектор плотности потока массы $\rho \vec{v}$ (ρ - плотность, \vec{v} - скорость), при описании распространения тепла вводят вектор плотности потока тепла \vec{q} , имеющий аналогичный смысл, а именно: количество тепла dQ , переносимое через площадку dS за время dt

$$dQ = q_n dS dt, \quad (1)$$

где q_n - проекция вектора \vec{q} на нормаль к dS ¹

Процесс теплопроводности в изотропных телах описывается законом Фурье: вектор теплового потока направлен вдоль градиента температуры (по нормали к изотермическим поверхностям) и пропорционален ему:

$$q = -\alpha \text{grad}T, \quad (2)$$

(знак минус указывает, что тепло переносится в сторону понижения температуры). Коэффициент пропорциональности α в формуле (2) называют коэффициентом теплопроводности или просто теплопроводностью (из контекста обычно ясно, идёт ли речь о процессе или о коэффициенте).

Коэффициенты теплопроводности различных тел имеют порядок величины от $0,1 - 1 \frac{\text{кал}}{\text{см сек град}}$ (металлы) до $10^{-5} - 10^{-4} \frac{\text{кал}}{\text{см сек град}}$ (газы и некоторые теплоизоляционные материалы).

Наиболее просто процесс теплопроводности описывается, когда поле температур одномерно (изотермические поверхности - параллельные плоскости; обозначая перпендикулярное им направление через z , можно сказать, что температура и другие переменные зависят только от одной координаты z) и стационарно (температура не зависит от времени). В этом случае, очевидно, градиент температуры $\frac{\partial T}{\partial z}$ в одномерной среде не может зависеть от z . Действительно, пусть, например, $\text{grad}T$ - положителен и в плоскости z_1 больше, чем в плоскости z_2 , ($z_1 > z_2$). Тогда, в силу (2), в заключенный между этими плоскостями слой вещества втекает больше тепла, чем вытекает из него, и слой должен нагреваться, что противоречит условию стационарности. Таким образом, в стационарном одномерном случае температура является линейной функцией координаты z , и вместо (2) и (1) можно написать

$$Q = \alpha (T_n - T_x) \frac{S}{d} t \quad (3)$$

где T_n и T_x - температуры "нагревателя" и "холодильника", между которыми заключён слой вещества толщины d и площади S , а Q - количество тепла, перенесённое за время t от нагревателя холодильнику.

Согласно молекулярно-кинетической теории коэффициент теплопроводности идеального газа

$$\alpha = \frac{1}{3} \rho C_v \bar{v} \bar{\lambda} \quad (4)$$

¹Вывод этой формулы для случая потока массы вам, конечно, известен. Для теплового потока формула (1) есть определение вектора \vec{q} . Обратите внимание на терминологию: потоком тепла через dS называют скалярную величину $q_n dS$ (поток через конечную площадь S равен $\int_S q_n dS$ и имеет смысл полного количества тепла, переносимого через S в единицу времени). Плотность потока \vec{q} есть вектор, который часто называют просто "вектором теплового потока" (указание на векторный характер величин позволяет опустить слово "плотность").

где ρ - плотность газа, C_v - его удельная теплоёмкость, \bar{v} - средняя скорость и $\bar{\lambda}$ - средняя длина свободного пробега молекул газа.

Из формулы (4) следует, что коэффициент теплопроводности не зависит от давления газа. Действительно, плотность газа прямо пропорциональна, а длина свободного пробега - обратно пропорциональна давлению газа, скорость же молекул и удельная теплоёмкость газа от давления не зависит.

Так как в выражение для λ входит значение средней длины свободного пробега молекулы, связанное с эффективным диаметром молекулы σ соотношением

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n_0}, \quad (5)$$

(где n_0 - число молекул в единице объёма), то, зная коэффициент теплопроводности газа можно оценить эффективный диаметр его молекул.

При очень низких давлениях газа, когда средняя длина свободного пробега молекул больше размеров сосуда, в котором газ заключён, обычное понятие теплопроводности - явления, обусловленного столкновениями молекул между собой - теряет смысл. Перенос тепла (теплопередача) существует и в разреженном газе, но механизм его иной. Так как молекулы здесь сталкиваются только со стенками сосуда, то процесс теплопередачи от более нагретой поверхности к менее нагретой можно приблизительно описать так. Молекулы газа при ударах о более нагретую поверхность приобретают энергию, соответствующую температуре этой поверхности. Отразившись от неё, молекулы, не сталкиваясь между собой, достигают более холодной поверхности, передают ей избыток энергии и отражаются от неё с энергией, соответствующей температуре холодной стенки. При таком способе передачи тепла от одной поверхности к другой внутри газа нет градиента температуры, поэтому и теряет смысл понятие теплопроводности. Очевидно, что в этих условиях количество тепла, переносимое газом, пропорционально числу ударов молекул о стенки, то есть давлению газа.

Задача работы. Установка и метод измерений.

Задачи, ставящиеся в работе:

1. Определить коэффициент теплопроводности газа.
2. Оценить эффективный диаметр молекул газа.
3. Исследовать явление теплопередачи при низких давлениях.

В качестве исследуемого газа используется воздух - смесь азота и кислорода. Оба эти газа - двухатомные, молекулярный вес этих газов примерно одинаков, и диаметры молекул близки между собой, поэтому воздух можно приблизительно рассматривать как газ, состоящий из однородных молекул.

Передача тепла осуществляется в сосуде Дьюара "8", рис.1 - это сферический стеклянный сосуд с двойными стенками, между которыми находится исследуемый газ. Сосуд помещён в термостат, в котором налита вода. Вода поддерживается при постоянной температуре T_n^1 . Во внутреннюю полость сосуда Дьюара наливается вода и вставляется термометр. (Вода во внутренней полости нужна для улучшения теплового контакта между стенками сосуда и термометром, она потребуется также при определении теплоёмкости сосуда).

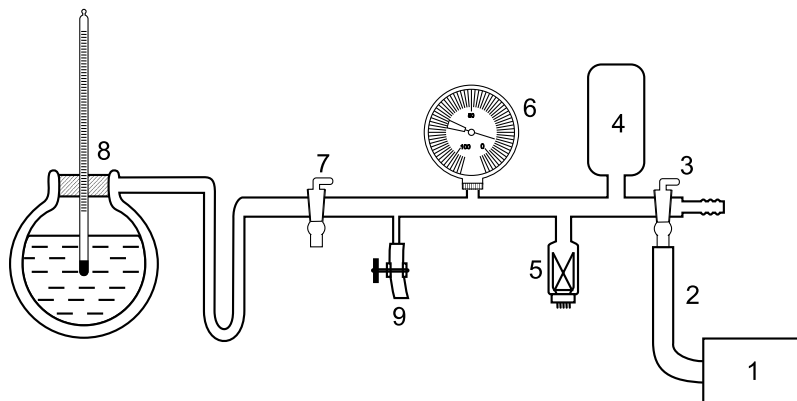


Рис. 1:

Промежуток между стенками сосуда Дьюара соединён с вакуумной установкой, позволяющей откачивать воздух из этого промежутка. (Описание вакуумной установки см. ниже).

¹Описание термостата см. ниже; оно также выдаётся в лаборатории.

Внутренняя полость сосуда служит "холодильником", принимающим тепло, переданное через слой газа от "нагревателя", которым служит вода, налитая в термостат.

Так как расстояние между стенками сосуда мало по сравнению с радиусом его поверхности, для описание теплопроводности можно воспользоваться уравнением (3), справедливым для плоского случая.

Пусть за время dt "холодильник" получил тепло dQ . При этом его температура возрастает на

$$dT_x = \frac{dQ}{C_x}, \quad (6)$$

где C_x - полная теплоёмкость "холодильника".

Подставляя в (6) значение dQ из (3), получим

$$\frac{dT_x}{dt} = \frac{\varkappa S}{C_x l} (T_H - T_x),$$

где S - площадь поверхности стенки сосуда Дьюара, а l - расстояние между стенками.

Решая это дифференциальное уравнение, находим закон изменения температуры "холодильника" со временем

$$T_H - T_x = (T_H - T_{x0}) e^{-\alpha t}. \quad (7)$$

Здесь T_{x0} - температура "холодильника" в начальный момент времени,

$$\alpha = \frac{\varkappa S}{C_x l}. \quad (8)$$

Если передача тепла происходит достаточно медленно, для определения x можно воспользоваться только начальной частью экспоненты (7). Раскладывая функцию $e^{-\alpha t}$ в ряд и пренебрегая малыми членами, получим

$$(T_x - T_{x0}) = \alpha (T_H - T_{x0}) t. \quad (9)$$

Таким образом, график зависимости $(T_x - T_{x0})$ от времени изображается прямой линией, угловой коэффициент которой пропорционален коэффициенту теплопроводности и зависит от величин S , l и C_x , характеризующих сосуд Дьюара. Площадь S поверхности стенки сосуда и расстояние l между стенками известны (эти данные написаны на каждой установке). Теплоёмкость "холодильника" нужно определить в процессе измерений.

Роль "холодильника" в нашем опыте играет внутренняя полость сосуда Дьюара, в которую налита вода и вставлен термометр. Соответственно, теплоёмкость его

$$C_x = c_v m_v - C_0, \quad (10)$$

где c_v и m_v - удельная теплоёмкость и масса воды, C_0 - теплоёмкость стенок полости и термометра.

Теплоёмкость c_v берётся из таблиц, величина C_0 неизвестна. Для её определения коэффициент α нужно измерить несколько раз с разными количествами воды m_v , налитой в "холодильник". Из уравнений (8) и (10) получим

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{C_0 l}{\varkappa S} + \frac{c_v l}{\varkappa S} m_v.$$

Начертив зависимость $1/\alpha$ от m_v сможем определить \varkappa и C_0 . Определение коэффициента α следует провести для различных давлений p , от атмосферного до предельного разрежения, которое позволяет получить вакуумная установка.

Начертите зависимость $\alpha(p)$, объясните вид полученной кривой. Выделите область давлений, где передача тепла происходит благодаря собственной теплопроводности, определите коэффициент теплопроводности \varkappa .

Определите эффективный диаметр молекул σ .

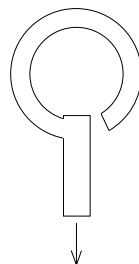


Рис. 2:

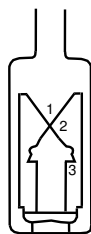


Рис. 3:

Вакуумная установка.

Вакуумная установка позволяет откачивать воздух из промежутка между стенками сосуда Дьюара, измерять давление и поддерживать его постоянным.

Схема вакуумной установки показана на рис.1. Откачка производится механическим форвакуумным насосом "1" (типа РВН-20 или ВН-461), позволяющим создавать разрежение до 10^{-3} тор. Для уменьшения шума насос установлен в специальном отсеке под столом. С вакуумной системой насос соединяется трубкой "2" из толстостенной вакуумной резины. Вакуумная система состоит из крана "3", отсоединяющего систему от насоса, балластного баллона "4", манометрической лампы ЛТ-2 "5", механического вакуумметра "6" и сосуда Дьюара "8", соединённого с системой краном "7". Зажим "9" служит для впуска воздуха в установку. Все части системы соединены стеклянными трубками¹.

Кран "3" может быть установлен в одном из трёх положений:

- а) форвакуумный насос соединён с вакуумной системой;
- б) насос соединён с атмосферой, вакуумная система перекрыта;
- в) насос отсоединён от вакуумной системы и от атмосферы.

Каждый раз, когда насос выключен, его нужно соединить с атмосферой (ставить кран "3" в положение б)), иначе масло из насоса может быть засосано в систему. Открывать и закрывать краны нужно очень медленно и плавно, без рывков.

Механический вакуумметр позволяет измерять давление от атмосферного до нуля. Основным элемент вакуумметра - пустотелая изогнутая пластина (рис.2). Если давление внутри пластины увеличивается, она выпрямляется, а если уменьшается - закручивается. Конец пластины через рычаг и шестерёночную передачу связан со стрелкой, конец которой перемещается по шкале.

Шкала манометра разделена на 100 делений. Шкала линейная. Для градуировки манометра нужно измерять его показания при атмосферном давлении (давление определить по барометру) и при предельном вакууме (проверяя одновременно качество откачки термодпарным вакууметром, см. ниже). Из этих данных можно определить цену деления шкалы.

Термодпарный вакуумметр позволяет измерять давление в пределах $10^{-1} - 10^{-3}$ тор.

Действие термодпарного вакуумметра основано на том, что при низких давлениях (когда длина свободного пробега молекул в газе больше размеров сосуда) скорость передачи тепла через газ зависит от давления. Следовательно, можно измерить давление по скорости отдачи тепла нагретым телом, помещённым в разреженный газ.

Датчиком термодпарного вакуумметра является манометрическая лампа ЛТ-2, которая соединяется с откачиваемым объёмом. Устройство термодпарной лампы показано на рис.3.

В стеклянном или металлическом баллоне укреплен V-образная нить "1", через которую пропускают ток. Эта нить служит нагревателем.

Через тонкую соединительную проволочку "2" тепло передаётся термодпаре "3", выполненной в виде слегка пружинящих подвесов. При изменении давления меняется теплоотдача через газ, вследствие чего меняется температура спая термодпары, а следовательно и термо-эдс. По изменению термо-эдс судят о давлении.

Схема питания нагревателя и измерительный прибор, служащий для измерения термо-эдс, смонтированы в блок вакуумметра. Измерительный прибор может быть проградуирован непосредственно в единицах давления либо в милливольттах, В последнем случае необходимо иметь градуировочную кривую для перехода от термо-эдс к давлению газа.

Подробнее об устройстве вакуумметра и порядке работы с ним см. в описании вакуумметра (выдаётся в лаборатории).

¹ В вакуумной системе имеются ещё и другие детали: ловушка, разрядная трубка и т.д., необходимые для выполнения других лабораторных работ. Они не используются в данной работе и на рисунке не показаны.

Сосуд Дьюара соединён с вакуумной системой стеклянной трубкой. Вынимать сосуд Дьюара из термостата нельзя. Чтобы удалить воду из внутренней полости сосуда, воспользуйтесь резиновой грушей. Количество воды, наливаемое в сосуд, отмеряйте мензуркой.

Примечание.

В некоторых установках механического манометра нет и вместо него используется масляный U-образный манометр. Устройство его видно из чертежа (см. рис.4). При подготовке манометра к работе открывают краны К6 и К7 и начинают откачку. Масло, которое залито в манометр, может пузыриться, что устраняется нагреванием его феном или пламенем спиртовки (старайтесь не касаться стекла пламенем). Откачку производить до предельно достижимого вакуума. Потом закрывают кран К7 - манометр к работе готов!

Если нужно впустить воздух в установку с работающим манометром, то это надо делать очень медленно и осторожно. Давление в установке можно поднять только до такого предела, чтобы уровень масла в манометре не опустился до места перегиба, иначе пузырьки воздуха могут прорваться в откаченное колено. Удобнее всего напускать воздух через *капилляры* и при одновременной откачке установки через кран К1. После того, как нужное давление в установке будет достигнуто, закройте сначала кран на капилляр, а затем сразу же - кран К1. Для впуска воздуха имеется несколько капилляров, присоединённых к установке через краны. На каждый капилляр надета резиновая трубка с зажимом для регулировки скорости натекания.

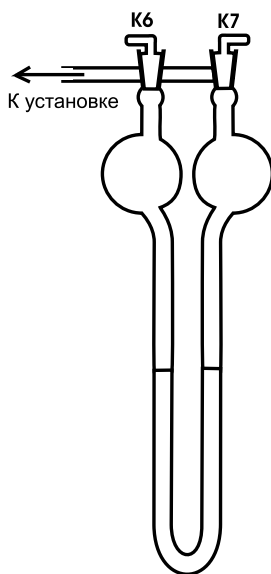


Рис. 4:

Устройство термостата и работа с ним.

Термостат ТС-16А представляет собой бак с двойными стенками, наполняемый жидкостью - водой (для температур от 80° до 100°С) или маслом (для более высоких температур - до 200°С). Температура жидкости регулируется двумя электронагревателями - основным, мощностью 1300вт, и дополнительным (мощностью 700вт), и охлаждающим змеевиком, через который пропускается водопроводная вода. Мешалка, которую вращает трёхфазный электромотор, обеспечивает равномерность температуры жидкости. Термостатируемый объект может погружаться в жидкость внутри бака через отверстие в крышке; кроме того термостат имеет центробежный насос (на одной оси с мешалкой), который позволяет прокачивать термостатирующую жидкость через системы, расположенные вне бака.

Термостат управляется контактным ртутным термометром типа ТПК. Капилляр этого термометра в верхней части соединяется с более широкой, эллиптического сечения, в которой помещается винт и эллиптическая гайка, поступательно перемещающаяся при вращении винта. Винт имеет на верхнем конце железное ярмо, которое можно вращать подковообразным магнитом, надеваемым сверху на головку термометра. На гайке закреплена одним концом тонкая вольфрамовая проволока, другой конец которой входит в капилляр. Вращением винта этот конец можно устанавливать на любой высоте в пределах шкалы термометра (для более удобной установки термометр в верхней части имеет вторую шкалу, по которой отсчитывается положение гайки). Через гайку и винт проволока электрически соединена с электродом, впаянным в верхний конец трубки; второй электрод, впаянный в баллон термометра, погружён в ртуть. При повышении температуры, когда конец столбика ртути в капилляре касается острия проволоки, замыкается цепь обмотки реле, которое выключает нагреватель¹.

Термостат включают в следующем порядке:

1. Проверьте наличие воды в баке. (Если заглянуть в бак нельзя, например, в работе №11 - то вставьте специальную рейку в отверстие для контрольного термометра, имеющееся в крышке. Вода должна доходить до метки, сделанной на рейке). В случае необходимости долейте дистиллированную воду до уровня метки.

2. Проверьте шланги, с помощью которых термостатируемая жидкость прокачивается через Ваш прибор. (Если термостатируемый объект находится внутри бака термостата, патрубки ввода и вывода жидкости соединены между собой). Включите двигатель насоса и мешалки. Убедитесь в том, что вода течёт через прибор и возвращается в термостат.

3. Установите контакт термометра на желаемую температуру (приблизительно). (Погрешность градуировки контактного термометра может достигать 1 – 2°, так что окончательно температуру отсчитывают и, если нужно, подправляют с помощью более точного термометра, помещаемого в термостатируемый прибор).

Магнитная головка термометра должна вращаться свободно, без усилия; если чувствуете сопротивление, не пытайтесь преодолеть его силой, а отпустите фиксирующий винт.

4. Включите основной нагревательный элемент термостата. Второй элемент (700вт) включается только при необходимости ускорить нагрев; его следует включать до достижения заданной температуры, чтобы не перегружать контакты реле.

Приложения к работе №11.

1. Термостат ТС-16А. Описание и правила эксплуатации.
2. Инструкция по эксплуатации термометров типа ТПК.
3. Термопарный вакуумметр ВТ-2. Описание и правила пользования.

Приложения выдаются в лаборатории, а также имеются в библиотеке, в единственном экземпляре.

¹В действительности контактным термометром можно разрывать только очень слабый ток, недостаточный для срабатывания мощного реле; поэтому в управляющей схеме используется дополнительное чувствительное реле и полупроводниковый усилитель. Подробную схему см. в заводской инструкции к термостату (имеется в приложении к описанию).