Конвекция

Конвективный теплообмен

Конвективный теплообмен – это сложный вид теплообмена, при котором совместно протекают процессы конвекции и теплопроводности. Конвекция происходит только в газах и жидкостях и состоит в том, что перенос теплоты осуществляется перемещающимися в пространстве объемами среды. Среды, которые участвуют в процессах тепломассообмена, называются ***теплоносителями.*** В качестве теплоносителей используются: вода, воздух, водяной пар, минеральные масла, нефть, органические жидкости, ртуть, расплавленные металлы и многие другие. В зависимости от физических свойств теплоносителей процессы тепломассообмена протекают различно. Наиболее часто используется **вода**, поскольку она широко распространена, имеет стабильный химический состав, нетоксична, обладает хорошей теплоемкостью.

Большое влияние на теплообмен оказывают следующие физические свойства теплоносителей:

- коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·К);
- удельная теплоемкость c, кДж/(кг·К);
- плотность ρ $\frac{кг}{м^3}$
- коэффициент температуропроводности a, м^2/с;
- коэффициенты динамической μ, Па·с, и кинематической ν, м^2/с,
- вязкости.

Эти параметры для каждого вещества имеют определенные значения и являются функцией температуры, а некоторые из них – и давления.

Понятие о пограничном слое

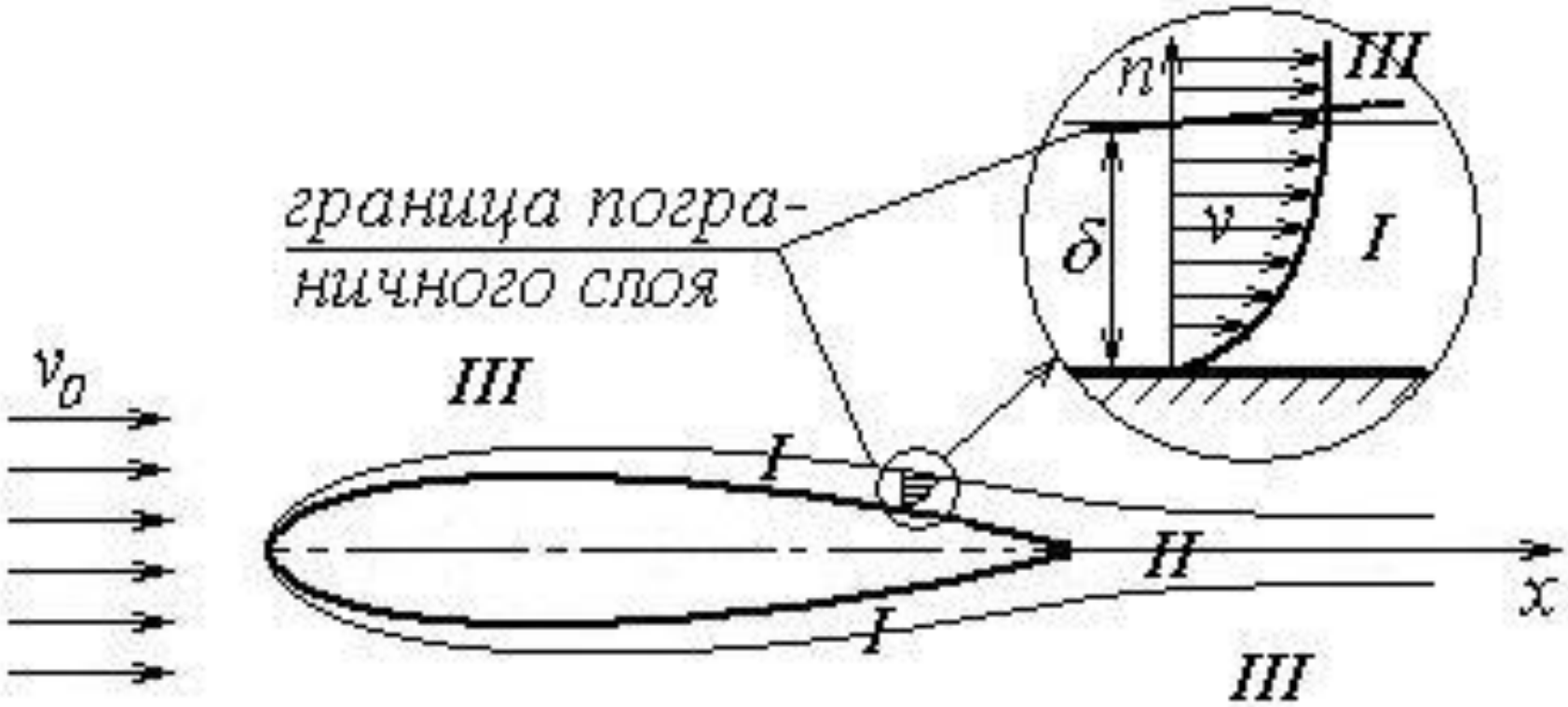


Рис. 20

Понятие о пограничном слое

- Рассмотрим процесс продольного омывания какого-либо тела безграничным потоком жидкости с постоянной скоростью течения w . Вследствие влияния сил трения в непосредственной близости от поверхности тела скорость течения должна очень быстро падать до нуля. Тонкий слой жидкости вблизи поверхности тела, в котором происходит изменение скорости жидкости от значения скорости невозмущенного потока вдали от стенки до нуля, непосредственно на стенке, называется *гидродинамическим пограничным слоем*. Толщина этого слоя δ возрастает вдоль по потоку. С увеличением скорости потока толщина гидродинамического пограничного слоя уменьшается вследствие сдувания его потоком. Напротив, с увеличением вязкости толщина гидродинамического слоя увеличивается.

Уравнение Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи

Из многих видов конвективного теплообмена выделяют часто встречающийся случай, когда теплотой обмениваются поверхность твердого тела и жидкость, движущаяся у этой поверхности. Такой вид конвективного теплообмена называют *теплоотдачей.*

Процесс теплоотдачи описывается уравнением Ньютона-Рихмана, или уравнением теплоотдачи приведенный ниже.

Коэффициент теплоотдачи α характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и жидкостью. По физическому смыслу α представляет собой тепловой поток, проходящий через 1 м^2 поверхности при разности температур между поверхностью тела и окружающей средой в 1 градус. коэффициент теплоотдачи – величина сложная и для ее определения невозможно дать общую формулу. Обычно для определения α приходится прибегать к опытным исследованиям.

Уравнение Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи

Опытным путем установлено, что в условиях свободной конвекции **для воздуха** α = 5÷25 Вт/(м^2·К), а **для воды** α = 20÷100 Вт/(м^2·К). В условиях вынужденной конвекции значения коэффициента теплоотдачи выше, например, **для воздуха** α = 10÷200 Вт/(м^2·К) и **для воды** α = 50÷10000 Вт/(м^2·К). Для кипящей воды α = 3000÷100 000 Вт/(м^2·К); для конденсирующего водяного пара α = 5000÷100 000 Вт/(м^2·К).

Коэффициент теплоотдачи зависит

- 1. от скорости потока носителя тепла
- 2. вида течения
- 3 геометрии поверхности твердого тела.
- Это сложная величина и ее невозможно определить общей формулой. Обычно коэффициент теплоотдачи находят экспериментально.

- Соотношение $$Q = \alpha_к \cdot (t_1 - t_2) \cdot F.$$

носит название **закона конвективной теплоотдачи Ньютона**.

- **Закон Ньютона**: **Количество передаваемой теплоты пропорционально падению температуры, площади поверхности ТТ *F*, участвующей в теплообмене, и времени теплообмена τ.**

- ***Коэффициент теплоотдачи α*** представляет собой количества тепла, передаваемой в единицу времени единице поверхности тела при разности температур между поверхностью ТТ и жидкостью в 1 К.

Существуют различные виды К. в зависимости от причин, её порождающих; наиболее распространённые - свободная, вынужденная и капиллярная К.

- ***Свободная (естественная) К.*** возникает под действием архимедовых сил в поле силы тяжести, если имеют место неоднородности плотности в отдельных местах среды, которые возникают в результате наличия в жидкости или газе разницы температур или концентраций примеси. Примером свободной К. является движение воздуха в помещении при наличии отопительного прибора (радиатора или печи). При увеличении температуры плотность газов уменьшается и нагретый воздух всплывает наверх, а его место занимает более холодный воздух, опускающийся вниз в др. части помещения. В результате в помещении развивается вихревое движение воздуха. Свободная К. играет важную роль как в технике, так и в природе, она определяет вертикальные перемещения воздушных масс в атмосфере и водяных масс в морях и океанах.

Вынужденная К. вызывается внешним механическим воздействием на среду. Примерами вынужденной К. являются движение воздуха в помещении под действием вентилятора, течение жидкости в трубе под действием гидронасоса и др. При движении тела в покоящейся среде относительное движение среды в системе координат, связанной с телом, также представляет собой частный случай вынужденной К. Физические процессы, происходящие при вынужденной К., связанной с движением тел с большими скоростями в атмосфере, моделируются в *аэродинамических трубах,* где воспроизводится обтекание неподвижных моделей потоком воздуха.

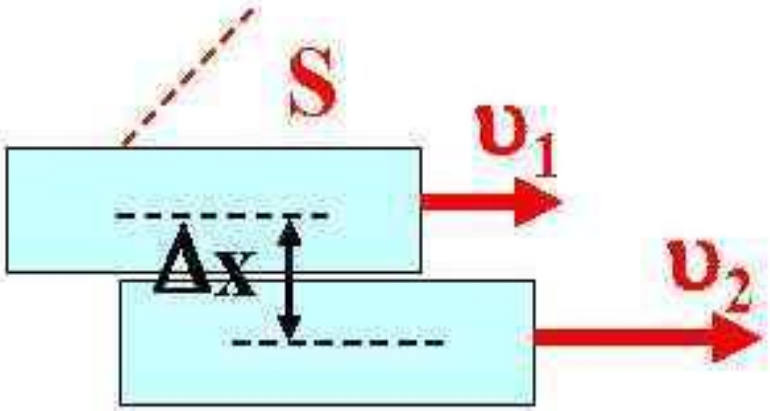
Капиллярная К. возникает в объёмах жидкости со свободной поверхностью при существовании вдоль такой поверхности перепадов поверхностного натяжения. Наибольшей распространённой причиной появления таких перепадов является изменение температуры вдоль свободной поверхности (термокапиллярная К.), другая возможная причина - присутствие в жидкости поверхностно-активной примеси с изменяющейся концентрацией. Интенсивность капиллярной К. довольно мала. В обычных условиях она, как правило, не является существенной на фоне вынужденной или свободной . Однако в космической технике, в условиях свободного полёта за пределами атмосферы, когда интенсивность свободной К. становится весьма незначительной из-за невесомости, именно благодаря капиллярной К. в сосудах с жидкостью могут возникать слабые конвек-тивные движения, которые (как и свободноконвективные движения, порождаемые микрогравитацией) существенно затрудняют практическую реализацию условий невесомости.

Вязкость жидкости

Силы, действующие между слоями, направленные по касательной к поверхности слоев, называются силами внутреннего трения или вязкости. Они пропорциональны площади взаимодействующих слоев (**S**) и разнице скоростей (**Δυ**) между ними. Силы внутреннего трения подчиняются **закону Ньютона**:

$$F_{тр} = \eta\,(\Delta\upsilon/\Delta x)\,S,$$ где

η - коэффициент внутреннего трения (вязкости),
Δυ/Δx – градиент скорости (**grad υ**), показывающий изменение скорости в направлении **x.**



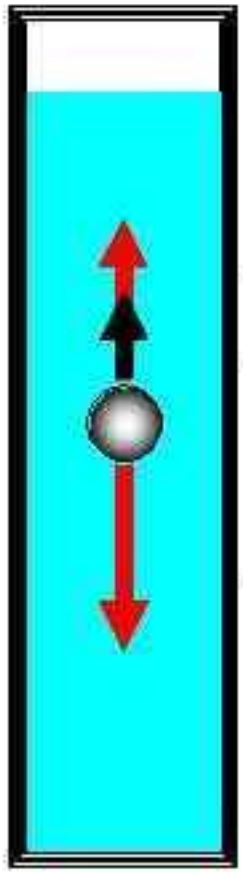
Вязкость некоторых веществ

Вещество	Воздух	Вода	Глицерин	Кровь	Плазма крови
Температура [°C]	20	20	20	36	36
Вязкость [Па·с]	$1{,}8\cdot10^{-5}$	$1{,}0\cdot10^{-3}$	$1{,}5\cdot10^{-3}$	$4{,}0\cdot10^{-3}$	$1{,}5\cdot10^{-3}$

Ньютоновские и неньютоновские жидкости

- Ньютоновские жидкости – такие, для которых вязкость не зависит от градиента скорости, они подчиняются уравнению Ньютона.
- Неньютоновские жидкости – такие, для которых вязкость зависит от режима течения и градиента скорости.

Определение коэффициента вязкости методом Стокса



$F_A = m_{ж} g$

$F_{TP} = 6\pi\eta r\upsilon$

$F_T = mg$

$$m\vec{a} = \vec{F}_T + \vec{F}_{TP} + \vec{F}_A$$

если υ = const, то a =0

$$F_T = F_{TP} + F_A$$

$$\eta = \frac{2r^2 g(\rho - \rho_*)}{9\upsilon}$$

Число Рейнольдса

- Английский ученый О. Рейнольдс (1842—1912) в 1883 г. установил, что характер течения зависит от безразмерной величины, называемой **числом Рейнольдса:**

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \langle v \rangle d}{\eta} = \frac{\langle v \rangle d}{\nu}.$$

- $\nu = \eta/\rho$ **- кинематическая вязкость;**
- ρ — плотность жидкости; $\langle v \rangle$—средняя по сечению трубы скорость жидкости; d — характерный линейный размер, например диаметр трубы.

Критерии подобия

В расчетах процессов **конвективного теплообмена** используют ***теорию подобия*** физических процессов путем объединения размерных величин в безразмерные комплексы – **критерии подобия**.

Формула	Название критерия	Величины, входящие в критерий	Значение критерия
$Nu = \alpha l / \lambda$	**Критерий Нуссельта** (критерий теплоотдачи)	α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/м² • К, l – геометрический размер, м; λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м • К)	Характеризует отношение между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое потока. Чем Nu выше, тем интенсивнее процесс конвективного теплообмена
$Re = wd/\upsilon$	**Критерий Рейнольдса** (критерий режима движения жидкости)	w – скорость потока, м/с; d – эквивалентный диаметр канала; υ – коэффициент кинематической вязкости, м²/с	Характеризует гидродинамический режим движения, являясь мерой отношения сил инерции и вязкости. При малых силах инерции и больших силах вязкости движение ламинарное, наоборот - турбулентное
$Pr = \upsilon\rho c_p/\lambda = \upsilon/a$	**Критерий Прандтля** (критерий физических свойств жидкости)	c_p – теплоемкость жидкости при const давлении, Дж/(кг • К); $a = \lambda/c_p\rho$ – коэффициент температуропроводности, м²/с	Характеризует физические свойства жидкости и способность распространения теплоты в жидкости. Для газов Pr = 0,67...1,0 и зависит только от атомности, для жидкостей Pr = 1 ... 2500, для металлов Pr = 0,005...0,05

Критерии подобия

Формула	Название критерия	Величины, входящие в критерий	Значение критерия
$Gr = \beta_p g l^3 \Delta t / \upsilon^2$ $\beta_p = \frac{1}{\upsilon_p}\left(\frac{\partial \upsilon}{\partial T}\right)_p$	**Критерий Грасгофа** (критерий подъемной силы)	β_p – коэффициент объемного расширения, K^{-1}; $\beta_p = 1/T$ – для идеального газа; Δt – разность температур в двух точках системы потока и стенки, К. Если $\rho_ж$ и $\rho_с$ – плотности жидкости в двух точках системы, то $(\rho_ж - \rho_с)/\rho_ж = \beta\Delta t$; $\beta = 1/(273 + t)$	Характеризует гидродинамическое подобие при свободном движении жидкости; отражает соотношение между подъемной силой, заставляющей всплывать нагретые частицы теплоносителя (архимедова сила), и силой вязкостного трения, препятствующей подъему этих частиц. Чем Gr выше, тем свободное движение интенсивнее
$Pe = wd/a =$ $= Re \bullet Pr$	**Критерий Пекле** (критерий теплового подобия)	То же	Характеризует отношение теплопроводного и конвективного переноса теплоты в потоке

Коэффициент теплоотдачи α определяют с помощью экспериментов на моделях и переносят на полномерные объекты, используя ***теорию подобия***. Для этого составляются критериальные уравнения типа:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr)$$

Если конвекция: *свободная* – то $Nu = f(Gr, Pr)$; *вынужденная* – то $Nu = f(Re, Pr)$

- При малых скоростях движения жидкостей имеет место ***ламинарный*** (спокойный, струйчатый) ***режим движения***, характеризующийся $Re < 2200 \div 2400$.

- При больших скоростях – ***турбулентный*** (возмущенный, вихревой) ***режим движения***, для которого $Re > 8000 \div 10000$.

- Промежуточный режим движения жидкости называется ***переходным***.

- В покоящейся жидкости **теплообмен** осуществляется **теплопроводностью**, ***если толщина слоя не велика и конвекция не развита***.

- С началом движения жидкости по мере перехода от малых скоростей к все большим и от ламинарного режима к турбулентному ***роль теплопроводности уменьшается***, а ***конвекции – растет***.

Критерий Рейнольдса **Re** – критерий режима движения жидкости.

Критерий Грасгофа **Gr** – критерий подъемной силы.

Критерий Нуссельта **Nu** – критерий теплоотдачи.

Критерий Прандтля **Pr** – критерий физических свойств жидкости.

Теплоносители

В качестве **теплоносителей,** в зависимости от назначения производственных процессов, могут применяться самые разнообразные вещества: *газообразные, жидкие и твердые*.

При выборе теплоносителя необходимо учитывать их термодинамические и физико-химические свойства, а также технико-экономические показатели.

1) Горячие теплоносители:

- водяной пар

Насыщенный водяной пар – самый распространенный теплоноситель. Обладает ***критической точкой***: $p_{кр}$ = 22,136 МПа; $T_{кр}$ = 374,15 °С.

Наиболее часто употребляемое давление пара – от 0,2 до 1,2 МПа.

- горячая вода

Наибольшее распространение – в отопительных и вентиляционных установках.

На ТЭС или районных котельных (с паровыми котлами) вода нагревается в специальных паро-водяных подогревателях. На остальных котельных – водогрейные котлы. В ЦТП подогрев – в водо-водяных подогревателях.

В основном: $t_{гор.воды}$ = 70 ... 150 (200) °С; $p_{гор.воды}$ = 6-7 атм (0,6-0,7 Мпа)

Виды теплоносителей

2) Горячие продукты сгорания – *дымовые и топочные газы*

В основном: $t_{газа}$ = до 1000 °С, т.е. нагрев материала до высоких температур

Недостатки (по сравнению с водой):

- плотность и теплоемкость меньше (нужен больший объем теплоносителя)
- коэффициент теплоотдачи ниже (нужны большие поверхности нагрева)

3) Высокотемпературные теплоносители (t = 300 – 400 °С)

Применяются в промышленности для высокотемпературного обогрева

Теплоноситель	Температура кипения	Теплоноситель	Температура кипения
Минеральные масла	300 ... 500	Кремнийорганические соединения	440
Нафталин	218	Нитрит-нитратная смесь	Выше 550
Глицерин	290	Сплав натрий-калий	784

4) Низкотемпературные теплоносители ($t_{кип}$ < 0 °С)

Типичные: аммиак NH_3; диоксид углерода CO_2, сернистый ангидрид SO_2, галоидные производные насыщенных углеводородов.

Применяются в качестве хладагентов в холодильной технике

тепловая труба (ТТ)

- тепловая труба (ТТ) – это замкнутое испарительно-конденсационное устройство, предназначенное для охлаждения, нагрева, или терморегулирования объектов. Впервые термин "тепловая труба" был предложен Гровером Г.М. и использован в описании к патенту (02.12.1963, Комиссия по атомной энергии США). Перенос тепла в ТТ осуществляется путем переноса массы теплоносителя, сопровождающегося изменением его фазового состояния (обычно испарение рабочей жидкости и ее последующая конденсация).

Водяной пар конденсируется на холодной алюминиевой крышке и стекает обратно в стакан в виде холодной воды, благодаря чему вода

и не может закипеть.

- Для примера возьмём бокал с небольшим количеством воды и поставим на плиту. В алюминиевую крышечку положим немного льда. Включаем!!!

Именно по такому принципу и устроены тепловые трубки, широко применяющиеся для охлаждения компьютеров.

- Разница только в том, что из промышленных образцов откачан воздух и вода в них закипает при более низкой температуре, градусах при тридцати. Второе принципиальное различие в том, что в тепловых трубках применяется капиллярный эффект, для того, чтобы система охлаждения могла работать в любом положении

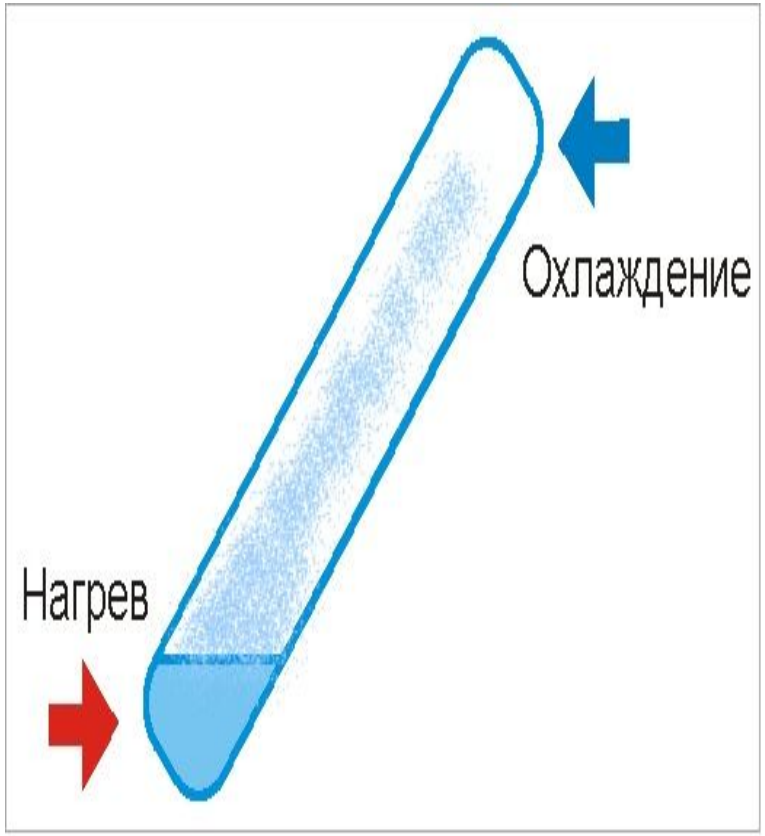
Как это происходит?

Пример в компъюторной технике!!!

1. Нагретый чип -2. Передает тепло по тепловой трубке – 3. Радиатор охлаждает за счет рассеяния в окружающую среду!

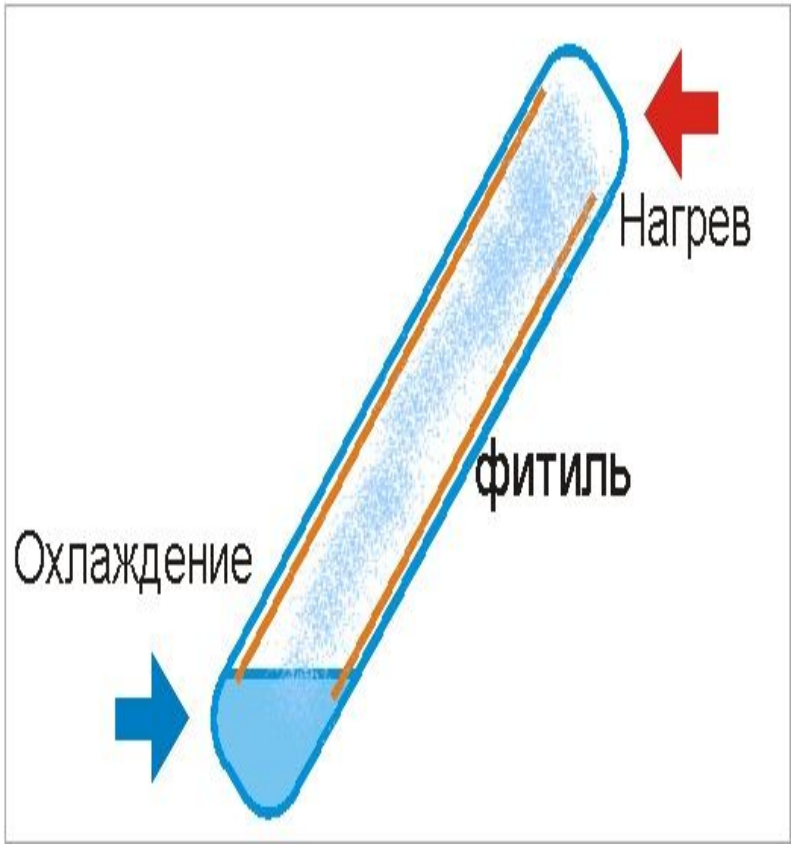
Как это происходит?

- Вот так работает классический термосифон, прародитель современных тепловых трубок. Снизу источник тепла, сверху – охладитель. Жидкость испаряется и образуется пар, который поступает в охладитель, где конденсируется, и превратившись в холодную воду стекает вниз, под действием сил гравитации. Если такую конструкцию перевернуть вверх ногами, то увы, ничего работать не будет…



Как это происходит?

Так как заставить тепловую трубку работать вверх ногами, как сделать так, что жидкость будет перемещаться наперекор силам гравитации? В этом нам помог капиллярный эффект, при котором жидкость, как известно, может подниматься вверх. Для этого в внутрь тепловой трубки запихивают обычный фитилёк, по которому и поднимается охлаждённая жидкость вверх, где она снова испаряется при нагреве .



Термосифон работает так:

- к нижнему концу (зона испарения) подводиться тепло, вода начинает испаряться без пузырькового кипения (это тоже очень важно, потому что при кипении на стенках ТТ возникают пузырьки, которые затрудняют отвод образующегося на греющей поверхности пара через толщу фитиля, и, следовательно, ограничивают мощность теплопередачи), поглощая при этом большую энергию, пар поднимается по трубе к холодному концу (зона конденсации), конденсируется, отдавая энергию, и в виде воды стекает по стенкам трубки вниз. Так как скрытая теплота фазового перехода у многих веществ достаточно высока, обеспечивается высокая плотность теплового потока. Термосифоны могут работать, если зона испарения находится ниже зоны конденсации, поэтому область их применения ограничена.
- Первые термосифоны применялись для выпечки хлеба в Америке в 19 веке. Нижний конец трубы подогревался в топке, а верхний конец был соединен с камерой, в которой выпекался хлеб. Благодаря тому, что ТТ и термосифоны обладают термостабилизирующими свойствами, хлеб никогда не пригорал.

Рабочая жидкость:

- обеспечивает теплоперенос в системе при рабочих температурах
- не должна разлагаться при этих температурах,
- должна обладать достаточно большой скрытой теплотой парообразования,
- должна хорошо смачивать материал фитиля и корпуса,
- должна иметь низкое значение вязкости жидкой и паровой фаз,
- должна иметь высокую теплопроводность и высокое поверхностное натяжение.
- В зависимости от интервала температур (указана температура охлаждаемого тела) могут быть использованы самые различные вещества приведенные к жидкой фазе – от сжиженных газов до металлов: гелий (-271 ... -269°C), аммиак (-60 ... +100°C), фреон-11 (-40 ... +120°C), ацетон (0 ... +120°C), вода (25 ... 200°C), ртуть (250 ... 650°C), натрий (600 ... 1200°C), серебро (1800 ... 2300°C) и т.д.