

Основы теории дровяного отопления



Горение

Общие понятия

- *Горение* – физико-химический процесс, при котором превращение вещества сопровождается интенсивным выделением энергии, тепло- и массообменом с окружающей средой и, обычно, ярким свечением (пламенем).
- С точки зрения химического процесса горение представляет собой высокоэнергетическую окислительно-восстановительную реакцию, способную протекать с прогрессирующим самоускорением вследствие накопления выделяющегося тепла (*тепловое горение*) или активных промежуточных продуктов (*цепное горение*).



- Химическая реакция горения во многих случаях является сложной и состоит из большого числа элементарных химических процессов.
- Горение может начаться самопроизвольно в результате самовоспламенения либо может быть инициировано зажиганием.



- Вследствие сильной нелинейной зависимости скорости реакции от температуры процессы горения отличаются высокой чувствительностью к внешним условиям при их незначительном изменении. Медленная реакция может перейти в режим горения, или, наоборот, развитое горение может прекратиться.
- Например, добавляя более сухое топливо (древесину, уголь) в очаг горения, можно значительно ускорить реакцию и мощность тепловыделения. При добавлении же более влажного топлива можно затормозить процесс горения увеличенным содержанием воды, обладающей большой теплоемкостью и проявляющей флегматизирующее действие.

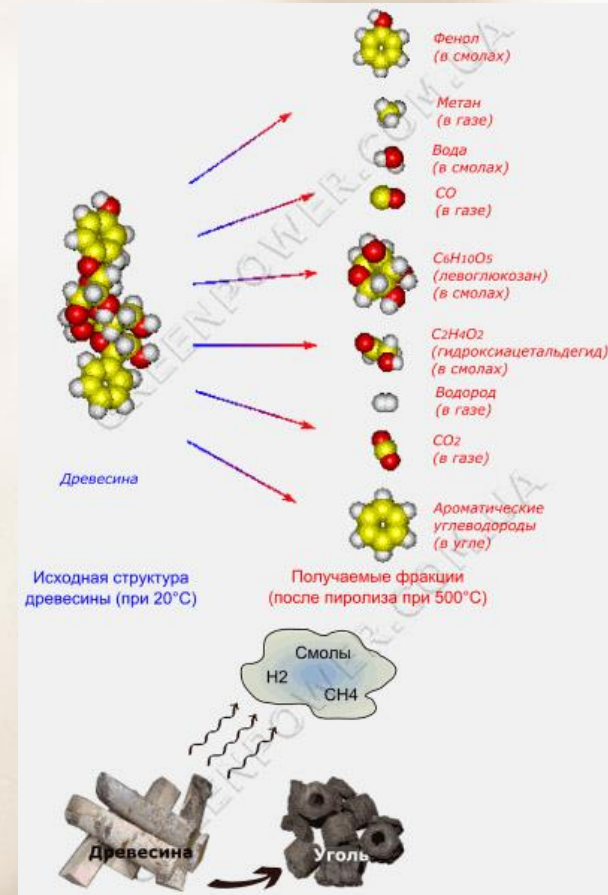
Термолиз



- Воспламенение и горение древесины есть следствие её нагрева до высоких температур в воздухе. В холодном состоянии древесина воздухом не окисляется. При нагреве древесина термически разрушается с образованием легкогорючих веществ, которые могут воспламеняться и поддерживать дальнейшее горение древесины.
- Поэтому для правильного понимания процессов горения необходимо знать как термически разрушается древесина. Общее понятие процессов разложения химических соединений под воздействием температуры называется *термолизом*.

Пиролиз древесины

- Первичное термическое разрушение древесины происходит внутри полена, а значит без доступа воздуха (ввиду слабой газопроницаемости древесины).
- Термическое разрушение древесины в инертной среде (без доступа кислорода воздуха или иных окислителей) называется термической деструкцией, термическим разложением или *пиролизом*.

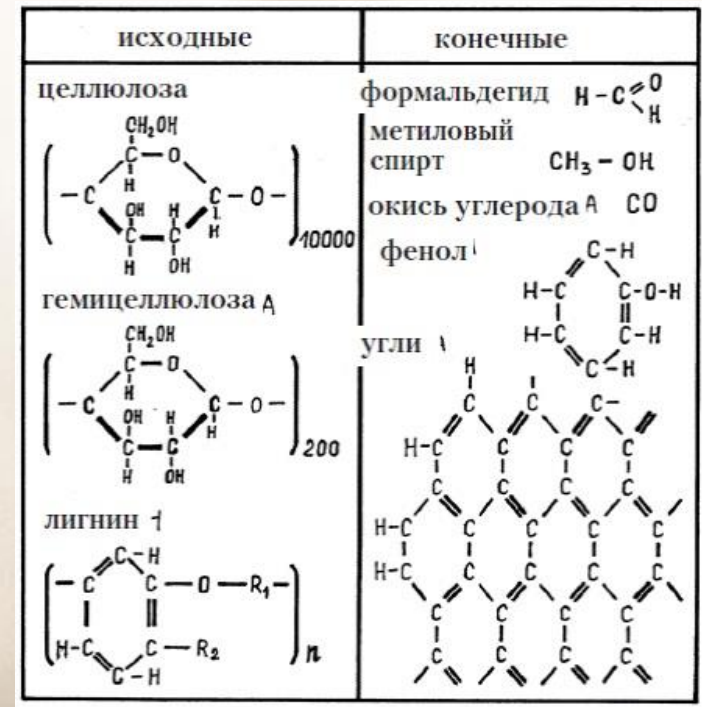


Первичный пиролиз

- При нагревании древесины без доступа воздуха (такой процесс называется «сухой перегонкой») сначала при температурах 100–150°C происходит полное испарение всей свободной и связанной (гигроскопической) воды,
- затем при 150–275°C происходит начальный пиролиз с потреблением теплоты.
- При температурах 275–450°C происходят главные реакции распада веществ древесины, причём с бурным выделением тепла (с саморазогревом древесины).
- Наконец, при 450–550°C происходит последняя стадия пиролиза, требующая подвода теплоты извне и заканчивающаяся образованием древесного угля, сохраняющего анатомическое строение древесины.

Древесина состоит из трёх типов натуральных полимеров – длинноцепной целлюлозы, короткоцепных гемицеллюлоз (пентоз и гексоз) и лигнина, состоящего из бензольных колец. Пиролиз любых органических соединений идёт через разукрупнение молекул (и цепей молекул) с отделением кислородных соединений углерода, летучих углеводородов, молекул водорода и воды

Одновременно идёт агрегация углеводородных остатков в углерод через формирование бензольных колец C_6H_6 (таблица), которые объединяются в двойные бензольные кольца (нафталиновые), затем в тройные (антраценовые) и так далее вплоть до сеток колец (микрочисталлов графита, а также высших непредельных углеводородов C_nH_m).



- При пиролизе твёрдых углеводородов образуется кокс или древесный уголь. При пиролизе углеводородных газов и паров углеводородных жидкостей образуется газовзвесь мелких углеродных частиц (чёрный дым), при осаждении дающая сажу (копоть).
- В любом случае образуется углерод в так называемой аморфной форме – в виде микрокристаллического (рентгеноаморфного) графита, имеющего связи с С–Н, а потому легко воспламеняющегося.
- Наибольшее дымоление даёт лигнин (которого очень много в коре берёзы), но лигнин даёт и в 1,5 раза больше тепла при сгорании, чем целлюлоза.



Вторичный пиролиз

- Процессы пиролиза, как правило, завершаются при нагреве древесины до 500–600°C. Но если продукты пиролиза заключить в герметичную ёмкость и нагреть их до более высоких температур, то состав продуктов пиролиза изменится при таком *вторичном пиролизе*.
- Во-первых, жидкие и газообразные продукты первичного пиролиза разрушаются до простейших соединений (H_2O , CO_2 , CO , H_2 и т. п.) и добавочного количества углерода как в форме древесного угля, так и в виде сажи (в том числе и в виде дыма).
- Во-вторых, древесный уголь (углерод) начинает газифицироваться – реагировать с водяными парами $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$. Количество воды в процессах пиролиза очень велико.
- В-третьих, древесный уголь (углерод) начинает газифицироваться в ходе реакции $\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$. Продукты высокотемпературного (вторичного) пиролиза, состоящие преимущественно из CO и H_2 , называются *синтезгазом* или *газогенераторными газами*.

Газификация углерода

- Сухая безводная окись углерода CO (угарный газ) практически не реагирует с кислородом O₂ до температуры 700°C. Выше 700°C протекает медленная *гетерогенная* реакция, то есть реакция идёт не в объёме, а с первоначальной сорбцией CO на поверхности твёрдых материалов. Причём некоторые вещества способны существенно снизить температуру окисления CO (например, в составе катализаторов для очистки выхлопных газов автомобилей от угарного газа).
- На скорость окисления углерода сильно влияет присутствие даже небольших количеств водяного пара или водорода, при этом реакция может стать даже *гомогенной* (в объёме) вне поверхностей твёрдых материалов. В целом, реакция углерода с CO₂ (углекислым газом) начинается примерно при температурах на 100°C выше, чем реакция с H₂O (водой), а учитывая, что воды в продуктах пиролиза намного больше, чем углекислого газа, то реакция газификации водой является ведущей.

Окислительный пиролиз

- Характер термического разрушения древесины при температурах ниже 300–350°C практически не зависит от того, в инертной среде или воздушной ведётся нагрев древесины. При более высоких температурах уже возможны процессы дополнительного окисления свободным кислородом $C_nH_mO_k + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$, в том числе аморфного углерода по реакции $C + O_2 \rightarrow CO_2$.
- *Пиролиз* называется *окислительным* в том случае, и когда количество вводимого кислорода настолько мало, что теплота окисления остаётся намного меньшей, чем подвод тепла для пиролиза извне. Если же количество подводимого кислорода уже начинает обеспечивать большую величину теплового эффекта окисления, то окислительный пиролиз приобретает название *горения*.

Фазы горючих смесей

- В зависимости от агрегатного состояния смеси горючего и окислителя, т.е. от количества фаз в смеси, различают: гомогенное и гетерогенное горение.
- Когда реакция горения протекает в системе, состоящей из одной фазы (агрегатного состояния), она называется *гомогенной* и протекает полностью в объеме данной фазы. Так сжигаются газы и пары в среде газообразного окислителя.
- Когда реакция горения протекает на поверхности раздела фаз с различными агрегатными состояниями, она называется *гетерогенной*. Наиболее часто это горение нелетучих материалов – металлов, графита.
- Многие газовые реакции имеют *гомогенногетерогенную* природу, когда возможность протекания гомогенной реакции обусловлена происхождением одновременно гетерогенной реакции. Твердая и жидкая фазы играют роль резервуаров реагирующих продуктов.

Фазовая модель горения твердого вещества

Сгорание твердого горючего вещества в продукт горения не сосредоточено только в зоне пламени, а происходит в разных фазах вещества (твердой и газообразной) и имеет многостадийный характер.

Нагрев твердой фазы вызывает разложение и выделение газов, которые воспламеняются и сгорают. Тепло от факела нагревает твердую фазу, вызывая ее газификацию и процесс повторяется, таким образом поддерживая горение.



Пламя

- Процессы горения газообразного, жидкого топлива, а также твердого (если при повышении температуры выделяются горючие газы или пары) сопровождаются образованием яркого свечения раскалённой газообразной среды - *пламени*.
- По степени подготовки горючей смеси различают диффузионное и кинетическое горение.
- Образующиеся при пиролизе древесины угли и горючие газы сгорают на воздухе по-разному, причём сами горючие газы горят по-разному в зависимости от того, смешаны ли они с воздухом предварительно в горючую смесь (гомогенные пламена) или не смешаны или частично смешаны (гетерогенные *диффузные* пламена).



Кинетические пламена

- *Кинетические* пламена получаются когда (в гомогенных пламенах) в подготовительную зону поступает смесь газов в концентрациях близких к стехиометрической пропорции. Они бывают нестационарными - присущи взрывам, а могут быть и стационарными, получены, например, в горелках при определенных условиях. В зоне горения образуются конечные продукты реакции – диоксид углерода, азот и вода, которые свет практически не излучают. Поэтому зона горения имеет слабо-голубой цвет независимо от его температуры.

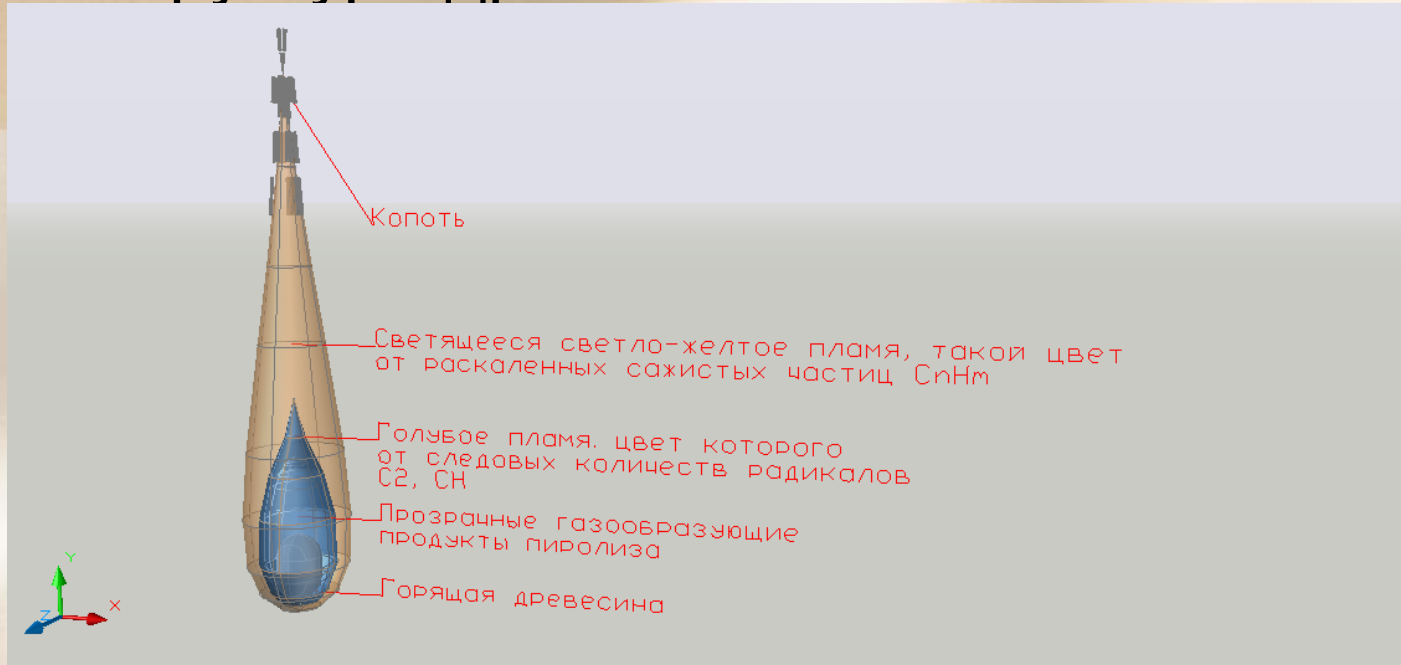


Диффузионные пламена

- Если в горючей смеси недостаточно окислителя, то в подготовительной зоне не успевают образовываться продукты первичного окисления, вследствие чего в зону горения поступают частицы углерода и пламя приобретает желтый или красно-желтый цвет.
- При *диффузионном* горении смесь образуется в зоне горения за счет диффузии горючего вещества из подготовительной зоны, а окислителя – из внешней среды. Цвет диффузионного пламени зависит от химического состава горючего вещества.



Структура древесного пламени

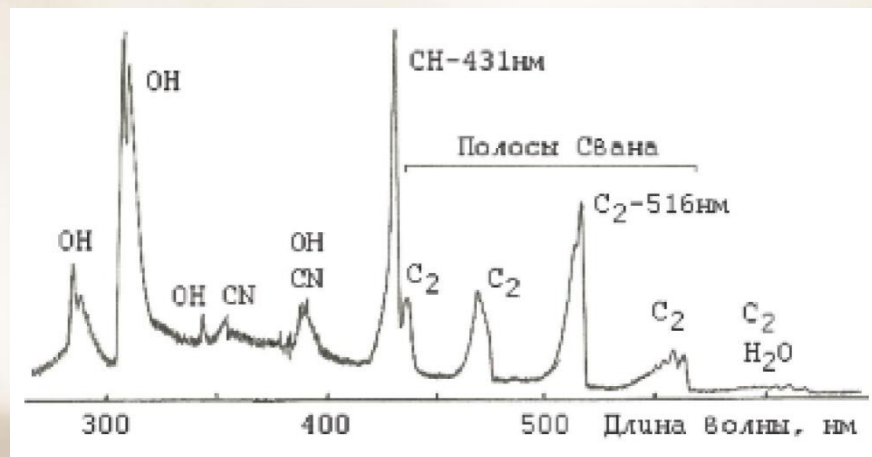
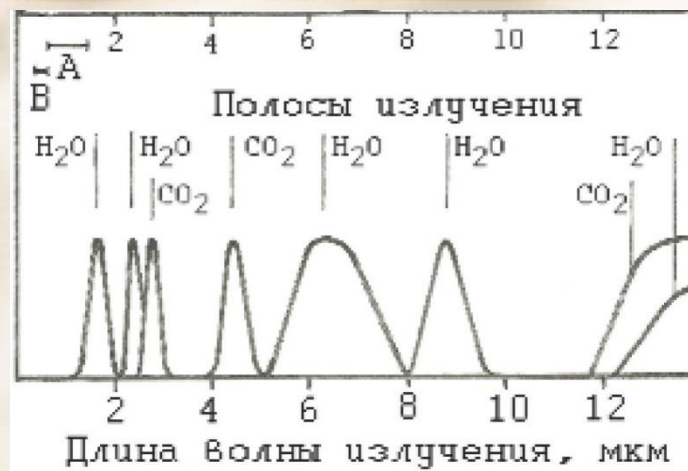


- Пламя над древесиной образуется в месте контакта объёма горячего газа с окружающим воздухом, в оболочке языков пламени.
- Языки пламени – это контуры потоков горючих продуктов пиролиза, визуальнo очерченные поверхностными оболочками зон горения. В зону (плёнку-слой) горения с одной стороны непрерывно диффундируют молекулы горючего газа, с другой стороны - молекулы кислорода. Продукты горения (молекулы воды и двуокиси углерода) столь же непрерывно удаляются диффузией навстречу и кислороду, и горючему газу.

- Процесс горения древесины является *саморегулирующимся*. Вокруг сперва идёт прозрачная, как будто бы ничем не заполненная зона. В этой зоне поток невидимых глазом газообразных продуктов пиролиза устремляется наружу и отталкивает ближнюю, *голубую, зону горения* от поверхности древесины в ней же поток тепла идёт от зоны горения на поверхности древесины и обеспечивает её пиролиз. Если голубая зона приближается к древесине, то поток тепла на древесину становится больше, образование газообразных продуктов пиролиза увеличивается, и голубая зона удаляется от древесины, уменьшая пиролиз.
- Ввиду нехватки кислорода в голубой зоне горения в диффузионной зоне реакции, образуются раскалённые сажистые частицы, которые и образуют светящееся пламя в виде языка светло-жёлтого цвета, называемое в народе огнём.

- Сами по себе основные составляющие газы в пламени древесины CO_2 , H_2O , N_2 не излучают в видимой части спектра при температурах реакций горения.
- Типичный спектр оптического излучения углеводородного пламени в видимой области содержит две важные полосы спектральных линий, определяющих цвет пламени. Это полоса углеводородного радикала CH с длиной волны излучения 431 нм, придающая пламени синий цвет, и полоса радикала диуглерода C_2 с длиной волны излучения 516 нм, придающая пламени зеленый цвет.
- Следы этих соединений в продуктах пиролиза окрашивают древесное пламя. В тех местах, где нет ещё сажистых частиц, особенно в ближней зоне определяющей и становится синий цвет.
- В удаляющейся от древесины зоне пламени свечение сажистых частиц определяющим делает желтое свечение.

- Характерный спектр излучения углеводородного пламени в инфракрасном спектре
- В – видимый спектр
- Характерный спектр излучения углеводородного пламени в видимой части спектра



- При диффузионном горении смесь образуется в зоне горения за счет диффузии горючего вещества из подготовительной зоны, а окислителя – из внешней среды. Цвет диффузионного пламени зависит от химического состава горючего вещества.
- Абсолютно сухая древесина содержит в среднем 49,5% углерода, 6,3% водорода, 44,1% кислорода и 0,1 % азота.

Характер свечения пламени	Содержание компонентов в горючем веществе, %	
	Кислород	Углерод
Бесцветное	Более 50	До 50
Яркое, без копоти	От 25 до 50	От 50 до 75
Яркое, с копотью	Менее 25	Более 75



Сажа

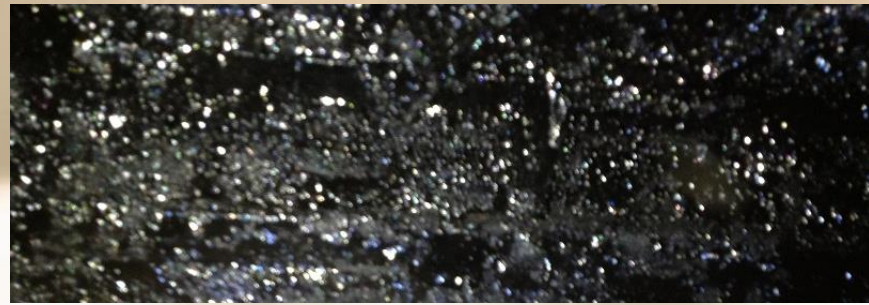


- Особенность горения древесины как топлива состоит в невозможности подвода воздуха к каждой точке поверхности каждого полена в топке. Поэтому газообразные продукты пиролиза древесины не могут сразу смешиваться с воздухом перед подачей в зону пламенного горения. Что обеспечивает обязательное появление сажистых и укрупнённых сажистых частиц. Данный факт однозначно определяет вид пламени в камине или печи - светящееся (от сажистых частиц) и коптящее (от укрупнённых).
- Вклад теплоты сгорания сажистых частиц обычно весьма невелик (доли процента), и поэтому дожигать их какими-то специальными дорогостоящими методами *энергетически* невыгодно (если это не связано с необходимостью чистоты аппаратуры, посуды или с экологическими соображениями). Сгорающие сажистые частицы в большинстве случаев не нагревают продукты сгорания, а охлаждают их за счёт лучистой теплопередачи.

- Учитывая, что сажа первично образуется в зоне разрушения углеводородов, отсутствие агрегатов сажистых частиц в нижней части пламени объясняется тем, что *при конденсации* на микрочастицу, например, одной молекулы метана выделяется две молекулы водорода. В результате образуется водородный “ветер”, дующий от частицы и препятствующий сближению и объединению частиц в агрегат.
- В кончике же пламени, где богатые водородом углеводороды уже отсутствуют, роль “ветра” играет СО, образующийся в ходе *реакций горения* сажистых частиц
- $3C + 2O_2 = 2CO + CO_2$ и
- $C + CO_2 = 2CO$

- При появлении же нехватки окислителя или при снижении температуры химические реакции окисления в кончике пламени замедляются, выход СО и скорость “ветра” резко снижаются, что и дает возможность микрочастицам сажи быстро агломерировать и образовывать *черный дым*.
- В то же время, крупные частицы могут при горении нагреваться значительно выше температуры окружающего газа. В этом режиме раскаленные агрегаты сажистых частиц могут сгорать быстро. Поэтому на кончике пламени спички можно заметить яркие продольные треки от струек-потоков горящих агрегатов сажи. А мелкие частицы (в том числе и сажи) всегда имеют температуру окружающего газа.





- Агрегаты черного дыма могут осаждаться в дымоходах в виде “сухой” сильно пачкающей пушистой сажи.
- Если одновременно осаждается *белый* (от первичного пиролиза) и черный дым, то в дымоходах образуется “жирная” маслянистая сильно пахучая сажа.
- Если черная сажа осаждается одновременно с водным конденсатом, то после испарения стекающей воды на стенках дымоходов остаются твердые слабopачкающие черные слоистые отложения-спеки, иногда блестящие.
- Все виды сажи в дымоходах являются горючими и представляют пожарную опасность.
- Кроме указанных дымов в отходящих печных газах может присутствовать пепел (не окомкованная и не спекшаяся зола) в виде газозвеси, а также горящие фрагменты древесного топлива в виде искр-треков или витающих ворсинок, листочков, веточек, представляющих пожарную опасность.

Воспламенение



- *Воспламенение* – начальная стадия горения, в течение которой энергия, подводимая к системе от внешнего источника, приводит к резкому ускорению химической реакции из-за прогрессивного накопления тепла (тепловое воспламенение) или активных промежуточных веществ (цепное воспламенение). Возможны два предельных режима теплового воспламенения: *зажигание* и *самовоспламенение*.

Зажигание

- *Зажигание* происходит в результате нагревания вещества от высокотемпературного источника тепла – накаливаемого тела, пламени, электрической искры и др. При этом реакция может ускоряться как по тепловому, так и по цепному механизму.
- *Тепловой* механизм зажигания наиболее изучен и соответствует большинству розжигов древесины. Различают три стадии этого процесса.





- 1. В веществе создается прогретый слой, в основном благодаря теплу от источника зажигания; при этом тепловыделение вследствие химической реакции несущественно.
- 2. Определяющее значение приобретает тепловыделение вследствие реакции, когда происходит так называемый срыв температуры, т. е. прогрессивное саморазогревание прогретого слоя.
- 3. Прогреваются соседние с прогретым слоем вещества (также, в основном, вследствие тепловыделения в процессе реакции), и формируется *волна горения*.
- Зажигание происходит при столь сильном прогреве системы от внешнего источника, что подводимое тепло не успевает равномерно распределиться по всему объему и ускорение реакции начинается в поверхностных слоях вещества.

Самовоспламенение

- Для древесины возникшее горение может проявиться либо тлением, либо пламенем. Случай самопроизвольного появления тления называется *самовозгоранием*. А случай самопроизвольного появления пламенного горения летучих над древесиной называется *самовоспламенением*.
- При медленных нагревах доминируют процессы самовозгорания обуглившейся древесины. Так что пламенное самовоспламенение древесины происходит, как правило, на значительно обуглившихся образцах и чаще происходит не от самовоспламенения летучих, а от воспламенения летучих от возгоревшихся или самовозгоревшихся углей.
- При быстрых нагревах создаются высокие концентрации летучих (неуспевающих “разлететься” в стороны), поэтому доминируют процессы самовоспламенения.
- Разброс температур самовозгораний-самовоспламенений древесины может оказаться значительным: от обычных температур самовоспламенения на уровне 400°С до случаев возгорания ниже 200°С.

- Температуры воспламенения древесины обычно 250-300⁰С,
- Температуры самовозгорания тлением древесины 260-320⁰С,
- Температуры самовоспламенения древесины 360-500⁰С

- При длительном нагревании *температура самонагревания*, при которой в веществе или материале, находящемся в атмосфере воздуха, возникают практически различные экзотермические процессы, значительно снижается. Например, самовозгорание древесины наблюдалось при 166 °С через 20 ч.
- Это явление необходимо учитывать при размещении деревянных конструкций вблизи нагреваемых предметов (отопительных приборов, труб, дымоходов и т. п.). Должны быть обеспечены такие условия изоляции от нагревания, чтобы установившаяся, длительно действующая температура не превышала 50 °С.



Температура горения веществ

- Энергия, которая выделяется в зоне горения, затрачивается на подготовку горючего вещества, на нагревание продуктов горения и на потери за счет теплового излучения в окружающую среду.
- Температура, до которой нагреваются продукты горения, называется *температурой горения*.
- Различают калориметрическую, теоретическую и действительную температуру горения.
- *Калориметрическая* (максимальная) температура горения — температура, до которой нагреваются продукты полного сгорания от 0 °С. Потери тепла принимают равными нулю. Калориметрическая температура горения зависит только от свойств горючего вещества.
- *Теоретическая* температура горения — температура, учитывающая потери тепла на диссоциацию при полном сгорании вещества.
- *Действительная* температура горения — это температура пожара. Она всегда ниже теоретической, поскольку горение протекает при недостатке воздуха и со значительными потерями тепла.
- Соответственно для древесины эти температуры:
2000 °С; 1600 °С; 1100 °С.

Теоретически необходимое количество воздуха
и максимальная температура горения для некоторых горючих

Горючее	Теоретически необходимое количество воздуха, м ³ /кг	Теоретическая (максимальная) температура горения, °С
	<i>Жидкое</i>	
Бензол	10,10	2200
Этанол	6,90	2080
Мазут	9,6–9,87	2080–2090
	<i>Твердое</i>	
Углерод (графит)	8,90	2145
Антрацит	7,20	2160
Древесина	4,76	2000
	<i>Газообразное</i>	
Водород	2,38	2200
Оксид углерода (II)	2,38	2340
Ацетилен	11,90	2520
Метан	9,52	2000

Теплотворная способность топлива

- *Теплотворная способность топлива* (ТСТ) представляет собой важную практическую характеристику, которая равна количеству теплоты, выделяющейся при полном сгорании 1 кг жидкого или твердого вещества или 1 м³ газообразного вещества до образования высших оксидов. Чем выше теплотворная способность топлива, тем выше его ценность.
- Теплотворная способность топлива Q_T , кДж/кг, рассчитывается по формуле

$$Q_T = - (-\Delta H_{\text{сг}} \cdot 1000/M), \text{ где}$$

$\Delta H_{\text{сг}}$ – тепловой эффект реакции полного сгорания топлива, кДж;

M – мольная масса, г.

Теплотворная способность (теплота сгорания)
некоторых видов топлива

Горючее	Теплотворная способность, кДж/кг	Теплотворная способность, кВт*ч/кг
Бензол	40 281 (низшая)	11, 189
	42 241 (высшая)	11, 734
Этанол	29 805	8, 279
Мазут	42 000 (низшая)	11, 667
Углерод (графит)	32 760	9, 100
Антрацит	31 000	8, 611
Древесина	14 800	4, 111
Водород	14 1000	39, 166
Оксид углерода (II)	10 107	2, 808
Ацетилен	50 160	13, 933
Метан	35 826 (низшая)	9, 952
	35 826 (высшая)	9, 952

Специфические энергетические единицы измерения

- Отопление дровами в первую очередь определяет оперирование единицами поставки тепла в помещение и потерями.
- Чтобы осуществлять удобный оценочный переход от единиц СИ к доступным для понимания потребителя значениям, для энергии и мощности применяются следующие единицы измерения.
- Энергия, поступающая за единицу времени, в СИ измеряется в джоулях: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с}$.
- Количество энергии, поступающей за 1 час = 3600 с составит $1 \text{ Вт} \cdot \text{час}$.
- Таким образом, производя деление данных по энергии в СИ на 3 600 000, получаем значение в единицах $\text{кВт} \cdot \text{час}$.
- Для оценки теплотворности дров удобной становится единица измерения $\text{кВт} \cdot \text{час} / \text{кг}$. Через неё проще вычисляется расход дров в отопительный период.

Распространение зоны воспламенения древесины

- Распространение фронта пламени по поверхности поленьев представляет собой процесс воспламенения все новых и новых зон поверхности древесины за счет нагрева от тепловыделений в уже существующих зонах горения.
- Спецификой древесины является высокая объемная теплоемкость (по сравнению с объемной теплоемкостью газов). Выделение тепла в ходе горения пропорционально площади горящей древесины, а тепло, потребное для разогрева новых частей полена, пропорционально объему древесины.
- Поскольку поверхность полена поперечного размера D растет пропорционально D , а объем древесины растет быстрее (как квадрат D^2), то с укрупнением поленьев возникают энергетические затруднения с пламенным воспламенением новых зон древесины.

Костер

- Тонкие поленья (спички, щепы, лучина) могут гореть самостоятельно в одиночку в холодной топке, и поэтому используются как растопка.
- Но крупное полно будет гореть только в условиях компенсации внешних потерь:
 - в раскаленной топке;
 - в виде кучи поленьев (костра, закладки), когда одно горящее полно греет другое.



Особенности пламенного горения древесины

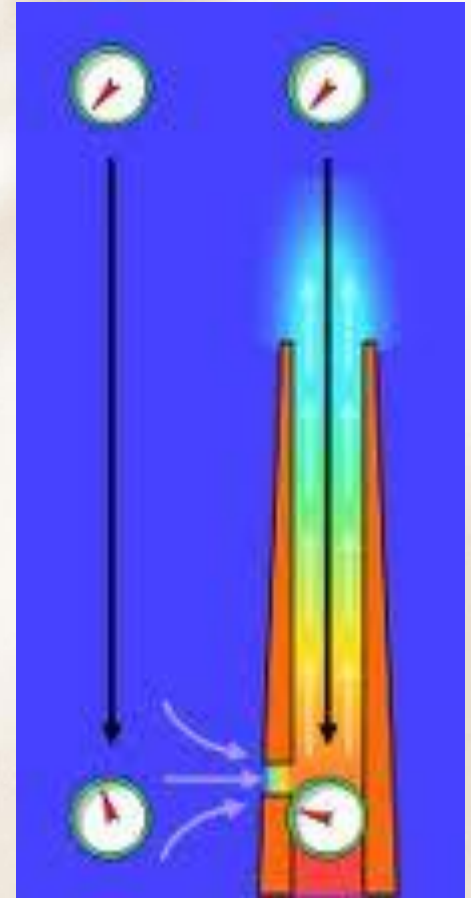
- Основной особенностью пламенного горения древесины является *постадийность выгорания* полена с изменением состава летучих и с изменением скорости выхода летучих. Это, вообще говоря, требует организации в печах постоянного управления процессом горения дров, в частности, скоростью подачи воздуха.
- Второй особенностью горения дров в печах является *коллективный характер сжигания* поленьев. Поленья горят в зазорах между поленьями как в микротопках с раскаленными обугленными стенками из древесины.
- Третьей особенностью горения дров является *многочисленность* одновременно горящих *пламен*. Это обуславливает их взаимное влияние термическим, газодинамическим и химическим путем. Газовые потоки вырываются из древесины из разных зон и в постоянно меняющихся направлениях.

- Ну и, конечно же, важной особенностью горения дров в печи является *необходимость* наличия *избыточных количеств воздуха* (над теоретическим стехиометрическим количеством), поскольку кончики пламен могут диффузионно догорать лишь при наличии вокруг них достаточной концентрации кислорода. При отсутствии избытка воздуха дрова гореть могут, но дымно. Считается условно, что исчезновение черного дыма наблюдается при повышении коэффициента избытка воздуха в печи до $\alpha = (1,5-2,0)$, а исчезновение угарного газа в дымовых газах при повышении коэффициента избытка воздуха до $\alpha = (2 - 3)$.



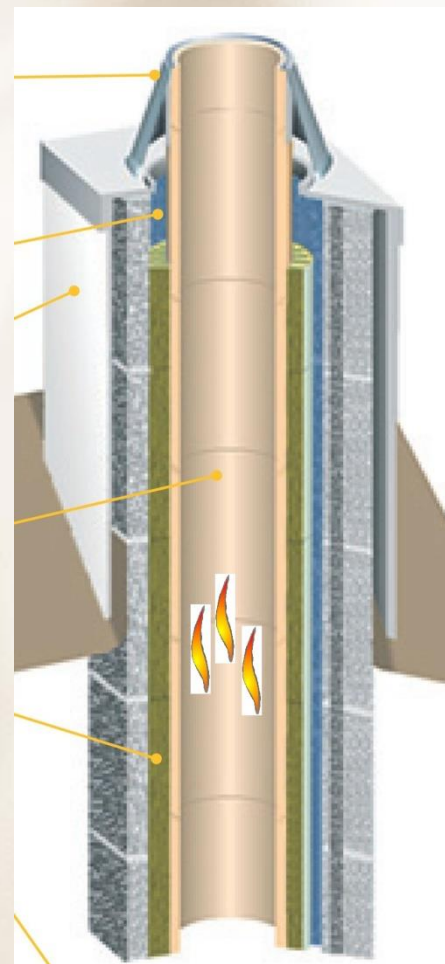
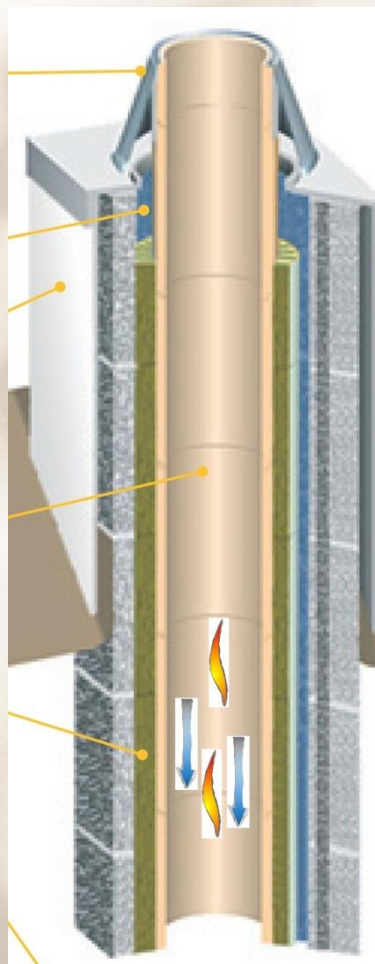
Тяга

- Поддержание процесса горения в закрытых топках возможно только при обеспечении постоянного притока окислителя в зону горения. Для дров – притоку воздуха.
- *Тяга* - это снижение давления газов в каналах технических систем, способствующее притоку среды в область пониженного давления.
- Естественная тяга функционирует благодаря Архимедовой силе - она обусловлена гравитационным движением газа, когда более лёгкий газ всплывает в более тяжелом. Такое движение в канале можно условно разделить на два вида по заполняемости сечения.



- Один вид течения - без перемешивания в сечении холодных и горячих газов, только за счёт гравитации. Здесь в канале явления тяги не существует. Горячие - вверх, холодные вниз.
- Другой вид - горячие (или холодные) газы заполняют всё сечение некоего канала расположенного внутри холодного (или соответственно, горячего) газа. При этом осуществляется *интеграция действия слоев* в направлении силы. Каждый новый элементарный объём газа, вошедший в сечение канала, ускоряется не только за счет своей собственной подъемной (опускной) силы, но и за счет ранее ускоренных объёмов, вошедших в сечение.
- Этот факт приводит к появлению разности давлений внутри и снаружи канала, а, следовательно, к направленному движению газов внутри него. В таком случае разность давлений характеризует канал усреднённой характеристикой - тягой. Чем больше разность плотностей внутреннего и внешнего для канала газа или высота канала, тем больше разность давлений, побуждающая *движущую силу* истекающих газов.

- Иллюстрации отсутствия и наличия тяги



Режимы в дымовом канале

- Для дымоходов надо понимать четыре основных состояния: до растопки отопителя, розжиг, во время сжигания топлива и при затухании.
- До горения только разность температур внутри и вне помещения может обеспечить *вентиляционную* тягу канала. По названиям: *прямую* - наружу, когда тёплый воздух помещения поступает в дымоход, и *обратную* - внутрь помещения, которая наиболее часто проявляется в тёплое время года. Поскольку разность температур невелика, то и значение вентиляционной тяги мало.



- Розжиг* - переходный процесс установления тяги. Начинается с движения вверх ускоряющихся горячих продуктов сгорания свободной дымовой струи. Горячие продукты сгорания устремляются вверх в виде сужающейся струи. С увеличением скорости, вследствие трения и вязкости газов, дым начинает увлекать за собой окружающий холодный воздух в виде расширяющегося турбулентного потока. Из-за такого увлечения холодного воздуха, температура потока снижается, но остаётся выше окружающего канал холодного воздуха. Как только с нарастанием расхода дыма расширяющийся тёплый поток перекроет сечение канала, возникнет тяга, которая будет нарастать по мере заполнения им канала.





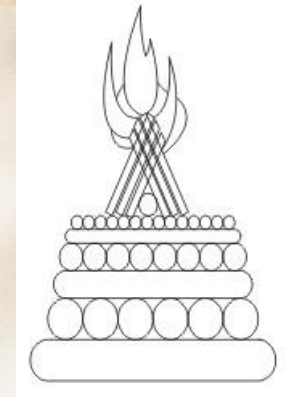
- Основной процесс сжигания топлива осуществляется при *установившейся тяге* и может контролироваться поступлением воздуха на сжигание и подмешиванием холодного воздуха в канал. Площадь сечения и высота канала выступают основными геометрическими ограничениями на величину возможного расхода газа. Теплообмен стенок дымового канала также влияет на температуру газового потока и, как следствие, на значение тяги.

- Завершение использования отопителя сопровождается уменьшением количества горячих газов, уменьшением температуры смеси горячих и холодных газов, а также уменьшением заполнения сечения, что *прекращает тягу*. Вопрос предотвращения выброса дыма в такой период в помещение также ложится на плечи разработчика камина.



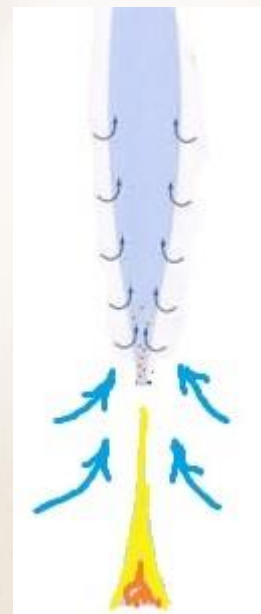
Верхнее горение

- Процесс розжига дровяного отопительного аппарата, обычно, преодолевает наибольшие затруднения. Поэтому следует, по-возможности, облегчать его, используя знание процесса.
- Выполнение растопки очага по принципу *верхнего зажигания*, позволяет плавно увеличивать количество горячих газов в дымоходе, избегая резкого столкновения с тяжелыми непрогретым воздухом.
- Для стартовой закладки следует внизу расположить крупные поленья, а вверху более мелкие, и источник огня вносить сверху.



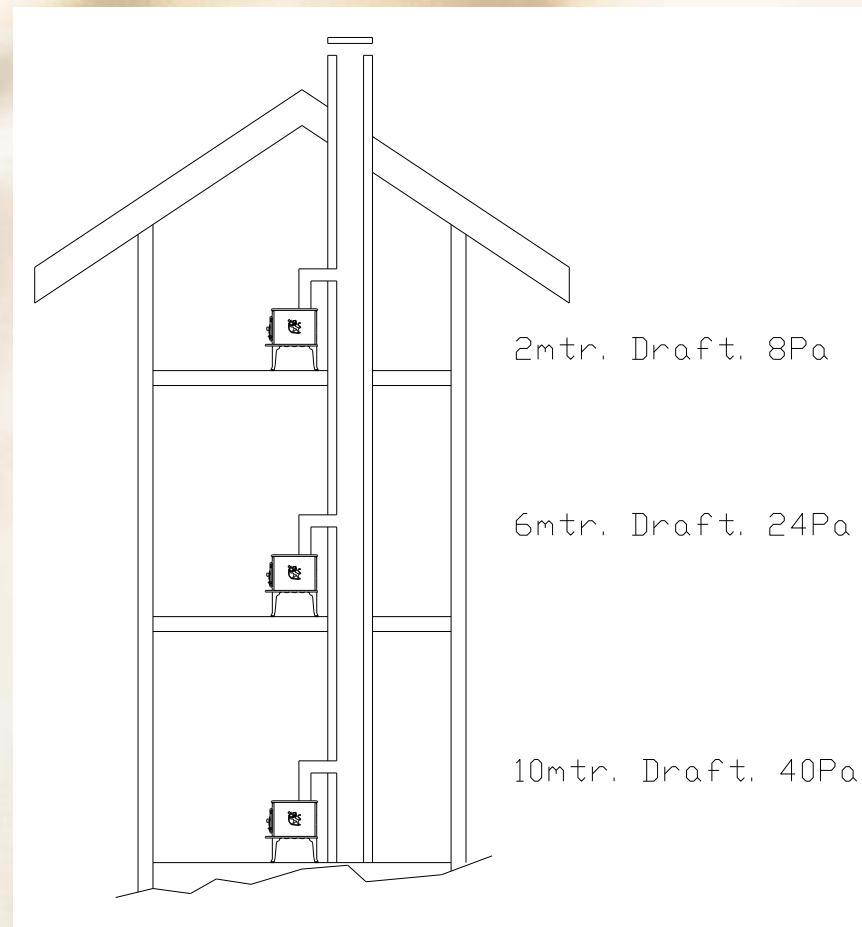
Эжекция

- В момент зажигания закладки рекомендуется спичку или лучину пронести мимо верхней границы проёма, чтобы проконтролировать отсутствие обратной вентиляционной тяги.
- Если пламя отклоняется внутрь помещения, необходимо прекратить зажигание и предварительно обеспечить повышение давления внутри помещения.
- После удачного воспламенения закладки рекомендуется некоторое время оставить проём аппарата открытым. Делается это для скорейшего заполнения дымового канала теплым воздухом за счет явления *эжекции* ввиду вязкости воздуха и увеличения турбулентности на границе горячих и холодных газов.



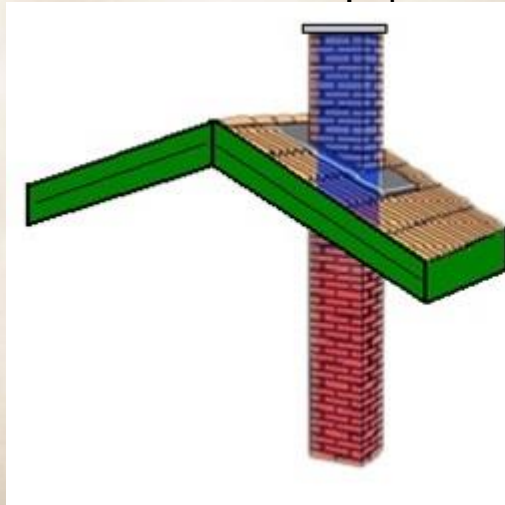
Дымовой канал

- За установившийся режим горения дров отвечает дымовой канал, Его задача генерировать тягу, которая обеспечивает приток окислителя и транспортировку наружу продуктов сгорания.
- Хорошая тяга имеет жизненно важное значение для хорошего горения. Нормальная тяга составляет 10-20 Па.
- В системе сжигания тягу генерирует дымоход, не топка. Высокая температура создает сильную тягу. Хороший результат достигается, когда высота и диаметр дымохода соответствуют бытовому прибору.

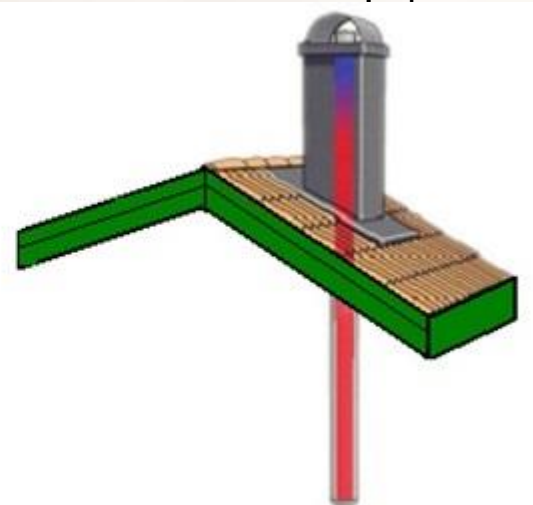


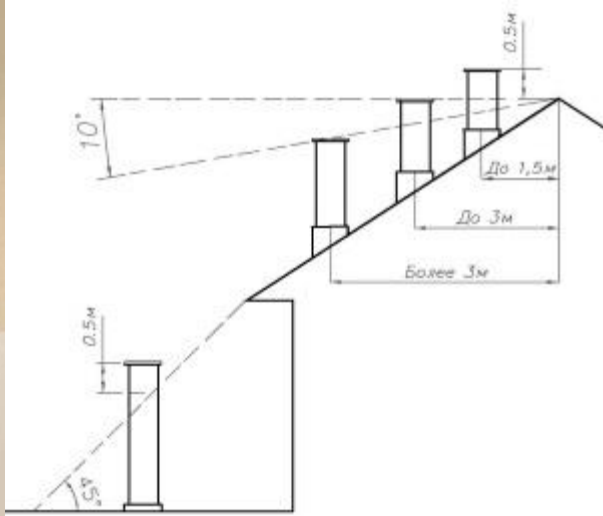
- Хорошая тяга создается дымоходом, когда у него минимальные тепловые потери, особенно вне помещения, и соответствующие аэродинамическому расчету параметры.
- Инерция массивного дымохода увеличивает переход к нормальному функционированию.

малая изоляция
большая инерция



хорошая изоляция
малая инерция





- Аэродинамические параметры дымовых каналов могут значительно влиять на сопротивление прохождения продуктов сгорания. Подлежат инженерному расчету.
- Расположение верхней части дымового канала следует выбирать вне зоны ветрового подпора, вне зависимости от общей высоты.
- Если при этом конструкция может создать избыточную тягу, рекомендуется устанавливать ограничивающие устройства. Преимущество в этом следует отдавать конструкциям, не перекрывающим выход дымовым газам.

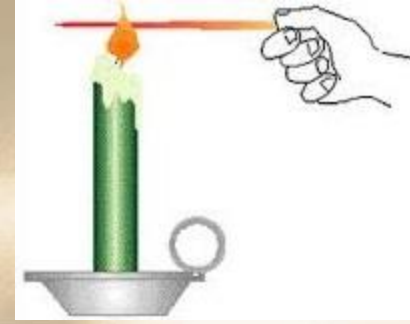


Теплопередача



- Организация извлечения запасов энергии из химических связей древесины представляет собой основу для распределения и сохранения её в задачах обогрева помещений.
- Физический процесс передачи тепловой энергии от более горячего тела к более холодному непосредственно или через промежуточную среду называется *теплопередачей*.
- Когда физические тела одной системы находятся при разной температуре, то происходит передача тепловой энергии от одного тела к другому до наступления термодинамического равновесия.
- Самопроизвольная передача тепла *всегда* происходит от более горячего тела к более холодному, что является следствием *второго закона термодинамики*: все самопроизвольные процессы в природе идут с увеличением энтропии. (энтропия - мера хаотичности, неупорядоченности системы).
- Всего существует три простых (элементарных) механизма передачи тепла.

Теплопроводность (кондукция)

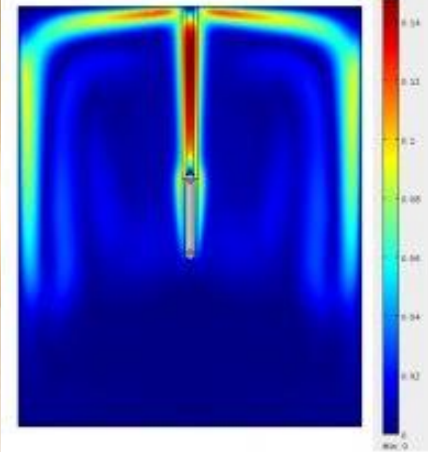


- *Теплопроводность (кондукция)* – это процесс переноса энергии хаотически движущимися частицами тела. Механизм зависит от агрегатного состояния вещества.
- *Коэффициент теплопроводности (λ)*. Это количество теплоты, проходящей через материал толщиной 1м, площадью 1м², за 1с при градиенте температур 1°К.
- записывается **Вт/(м·°К)**
- *Термическое сопротивление (R)*.
 $R=d / \lambda$ Тепловое сопротивление материала определяется путем деления значения толщины (d), выраженного в метрах, на значение теплопроводности (λ):
- измеряется **(м² · °К)/Вт**. Чем больше эта величина, тем выше эффективность изоляции из данного материала. Тепловое сопротивление меняется в зависимости от типа, плотности и пористости структуры материала, а также от влажности и перепада температур.

№	Материал стены	Коэффициент теплопроводности и $\lambda_{с}$, Вт/(м · °С)	Требуемая толщина в мм
1	Пенополистирол ПСБ-С-25	0,042	124
2	Минеральная вата <u>Rockwool Facade Batts</u>	0,046	135
3	Клееный деревянный брус или дерево-массив (сосна и ель поперек волокон (ГОСТ 8486, ГОСТ 9463) 500 кг/м ³	0,18	530
4	Кладка на теплоизоляционный клей керамических блоков ПОРОТЕРМ	0,17	575*
5	Кладка на клей из газо(пено-)бетонных блоков 400 кг/м ³	0,18	610*
6	Кладка на клей из полистиролбетонных блоков 500 кг/м ³	0,19	643*
7	Кладка на клей из газо(пено-)бетонных блоков 600 кг/м ³	0,29	981*
8	Кладка на клей из керамзитобетонных блоков на керамзитовом песке и керамзитопенобетон 800 кг/м ³	0,31	1049*
9	Кладка из керамического пустотного кирпича плотностью 1000 кг/ м ³ (брутто) (ГОСТ 530) на цементно-песчаном растворе	0,52	1530
10	Кладка из глиняного обыкновенного (ГОСТ 530) кирпича на цементно-песчаном растворе	0,76	2236
11	Кладка из силикатного (ГОСТ 379) кирпича на цементно-песчаном растворе	0,87	2560
12	Железобетон (ГОСТ 26633) 2500 кг/м ³	2,04	6002

* с добавлением коэффициента неоднородности 1,15 на теплотери необходимых в конструкции зданий монолитных поясов и несущих перемычек из тяжёлых бетонов.

Конвекция



- *Конвекция*– это процесс, при котором внутренняя энергия передается струями и потоками. Характерен жидкостям и газам.
- *Естественная конвекция* возникает в веществе самопроизвольно при его неравномерном нагревании в поле тяготения. При такой конвекции нижние слои вещества нагреваются, становятся легче и всплывают, а верхние слои, наоборот, остывают, становятся тяжелее и опускаются вниз, после чего процесс повторяется снова и снова.
- *Вынужденная (принудительная) конвекция* перемещает вещества действием каких-то внешних сил (насос, лопасти вентилятора и т. п.). Она применяется, когда естественная конвекция является недостаточно эффективной.
- Различают ламинарную и турбулентную конвекцию.

Излучение

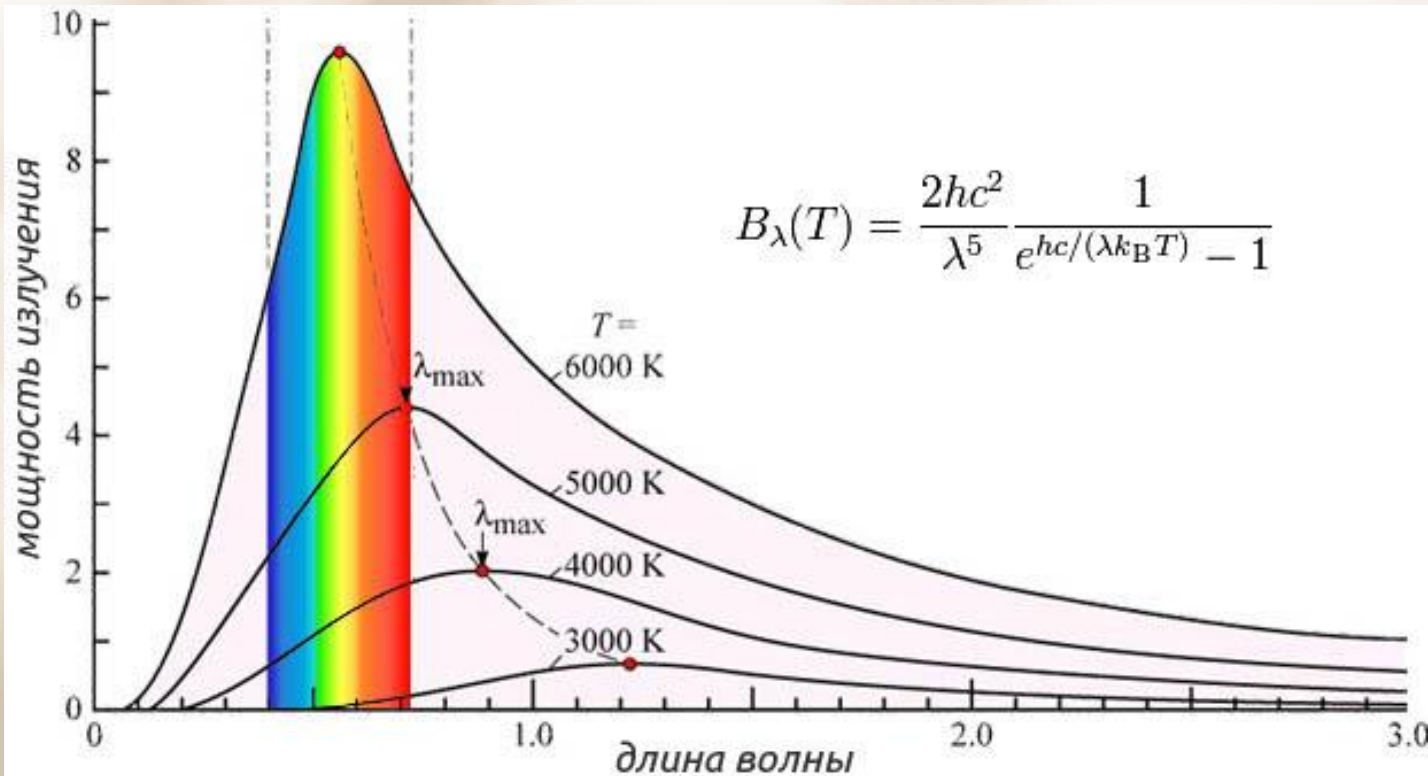


- *Тепловое излучение (тепловая радиация)*– это электромагнитное излучение, возникающее за счёт внутренней энергии тела.
- Для твердого тела имеет *сплошной спектр*, максимум которого зависит от температуры тела. При остывании последний смещается в длинноволновую часть спектра.
- Для газов – *спектр дискретный*. Одно-и Двухатомные газы (O_2 , N_2 , Ar , He и др.). Имеют совсем малую излучательную способность и коэффициент поглощения. Эти газы считаются прозрачными для тепловых лучей. Трех-и многоатомные газы (H_2O , CO_2 , NO_2 , SO_2 и др.). Имеют значительную излучательную способность, а следовательно, и коэффициент поглощения.
- Энергетическая светимость тела численно равна энергии , испускаемой телом за единицу времени с единицы площади. измеряется **Вт/м²**
- Энергетическая светимость (q) абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры (T).

$$q = \sigma \cdot T^4$$

Длина волны ($\lambda_{\text{макс}}$), на которую приходится максимум энергии в спектре равновесного излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре (T) абсолютно черного тела.

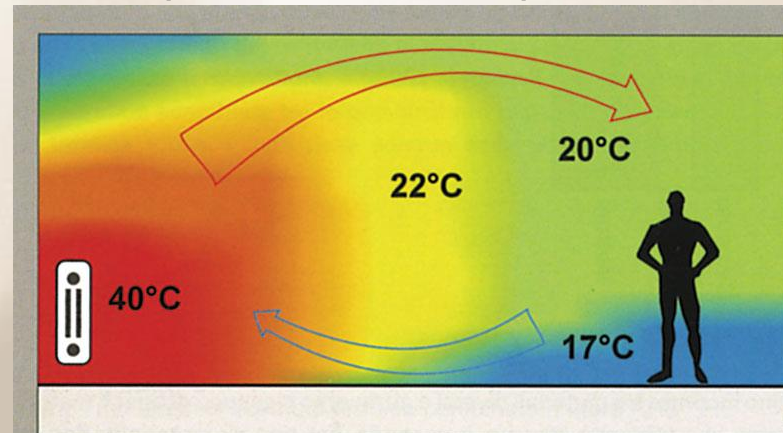
$$\lambda_{\text{макс}} = b / T$$



$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1}$$

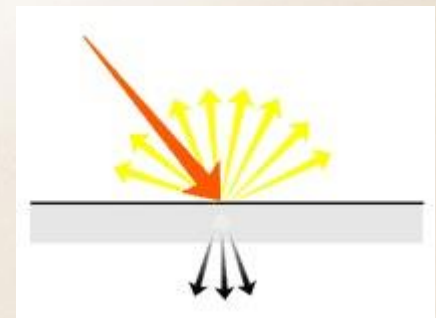
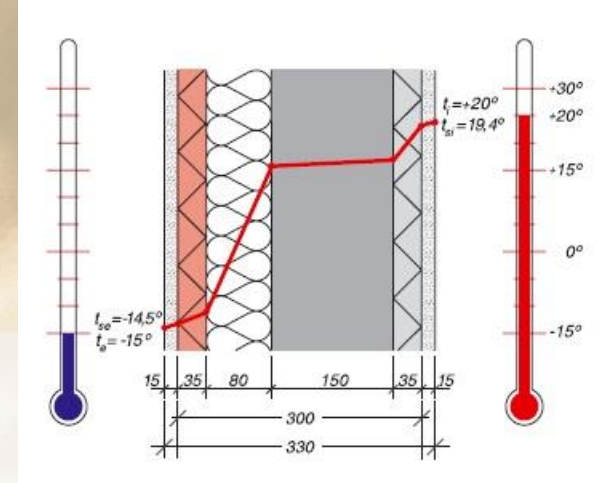
Комбинированные виды теплопередачи

- Существуют также различные виды сложного переноса тепла, которые являются сочетанием элементарных видов.
- Как *обобщающий пример* совместной работы трёх типов теплопередач можно привести обычный радиатор водяного отопления.
- Кондуктивная теплопередача передаёт через металл радиатора тепло воздуху,
- который в свою очередь конвекцией переносит тепло к удалённым от радиатора предметам.
- Помимо этого нагретая поверхность радиатора в свою очередь начинает излучать тепловую энергию которая опять же нагревает предметы вокруг.



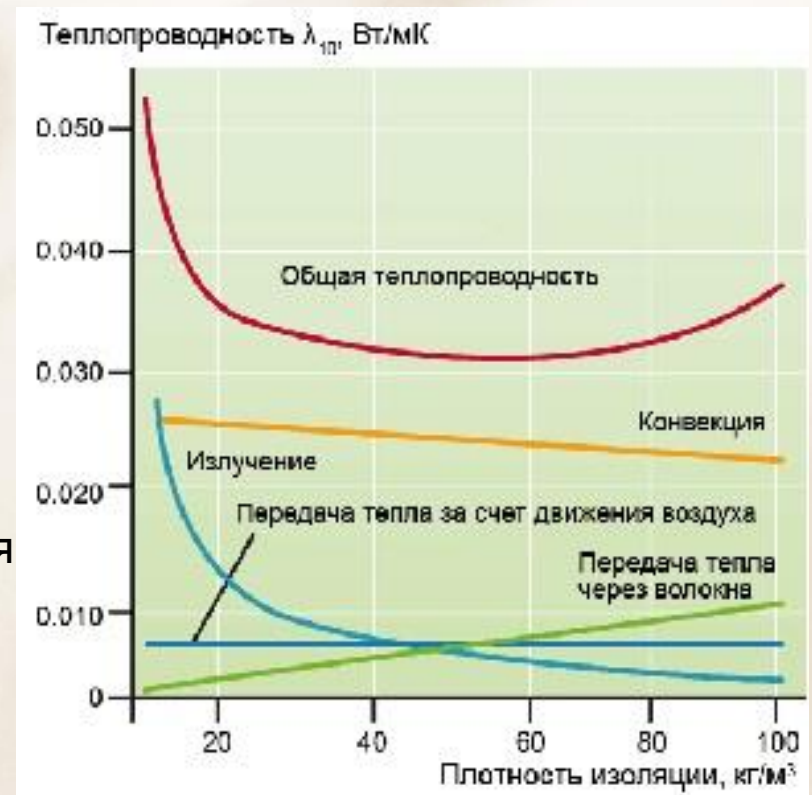
Тепловая изоляция

- *Тепловая изоляция* предназначена для регулирования различных факторов, влияющих на характеристики передачи тепла. Для каждого вида теплопередачи создаются соответствующие технические средства ограничения.
- Для теплопроводности таким средством выступает внесение теплового сопротивления материала.
- Для конвекции – это уменьшение потоков жидкости или газа.
- Для излучения – применение отражающих или рассеивающих материалов.

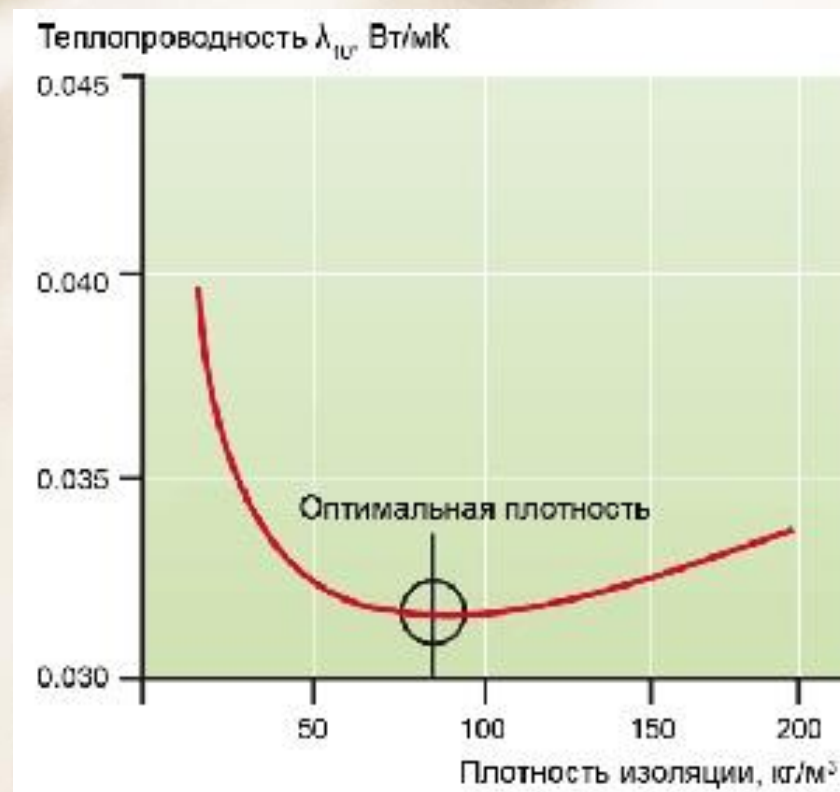


Волокнистая изоляция

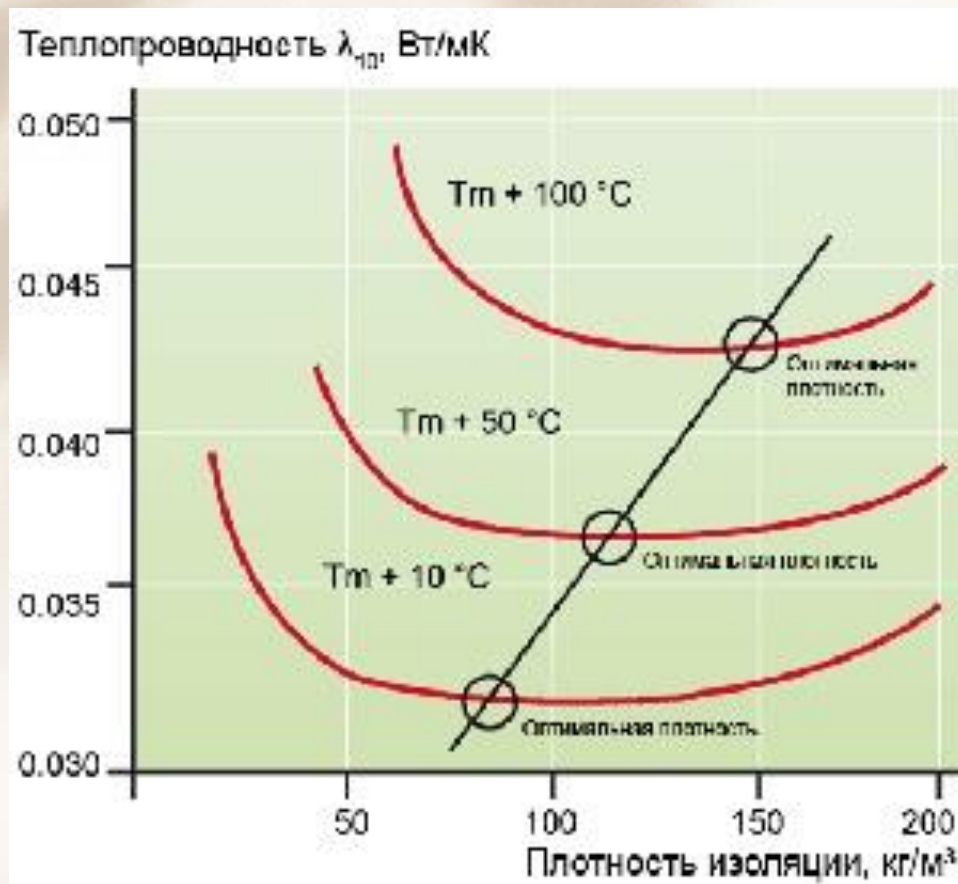
- Основной изолирующий материал современного строительства – волокнистая изоляция. Теплопроводность изделий из неё складывается из четырех составляющих:
- теплопроводность неподвижного воздуха в полостях между волокнами ваты;
- передача тепла через волокна;
- естественная и/или принудительная конвекция, возникающая в результате перемещения воздуха внутри изоляционной ваты;
- тепловое излучение.



- В вате с низкой плотностью достаточно свободного пространства для распространения излучения и перемещения воздуха.
- Увеличение плотности изоляционной ваты ведет к снижению интенсивности происходящей через нее конвективной передачи тепла, однако особенно сильно это препятствует распространению теплового излучения.
- При увеличении плотности изоляции передача тепла через волокна также увеличивается, однако величина этого увеличения незначительна.

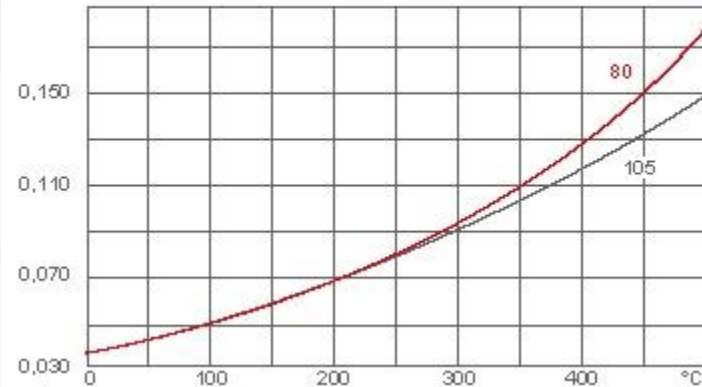


- Повышение средней температуры вызывает увеличение теплопроводности.
- Чем выше средняя температура, тем больше оптимальная плотность изоляции.
- Именно это обязывает установщиков дровяного отопления применять более плотные ваты в изоляции - плотностью не менее 100 кг / м³.

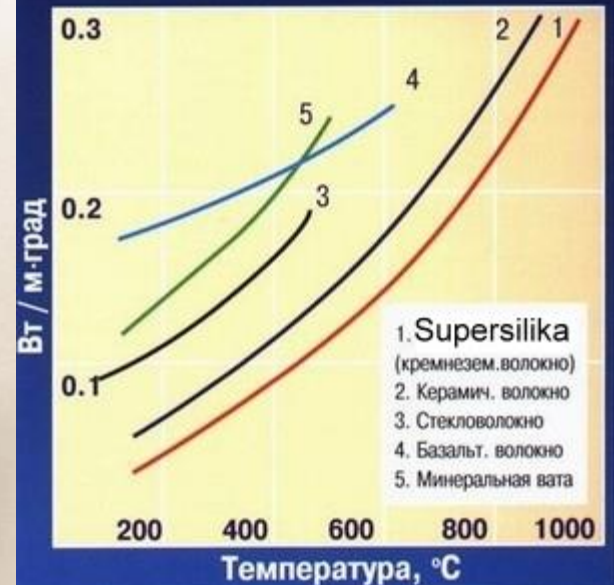


- Для трубо-печных работ очень важной является зависимость коэффициента теплового сопротивления волокнистой изоляции от температуры.
- В температурных условиях пожара в дымоходе (900-1000 °С) этот параметр находится далеко за пределами рекламных цифр при 0-100 °С. И в 10 раз могут отличаться. Обязательно учитывать это в расчете изоляции.

Теплопроводность,
Вт/м °С

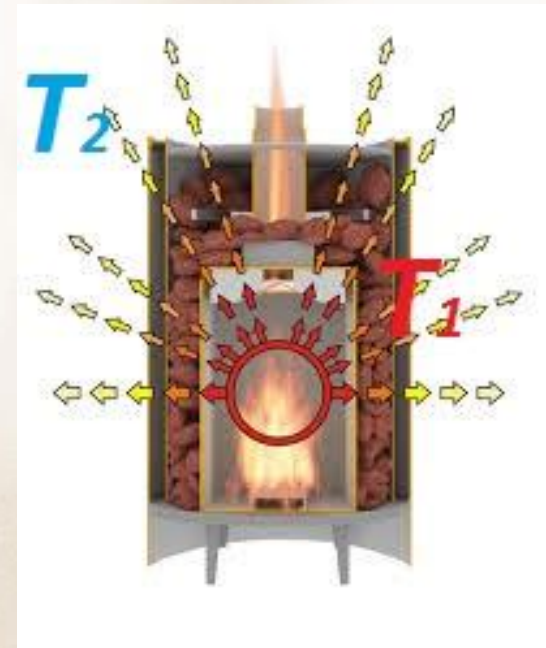


Сравнение теплопроводности матов из различных волокон

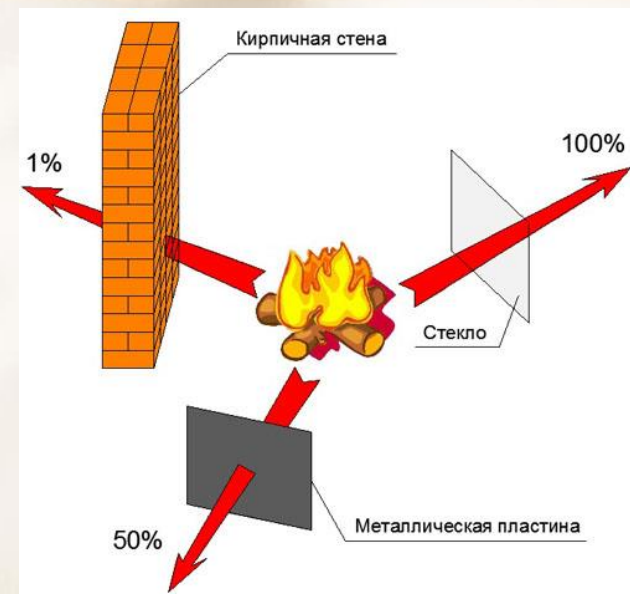


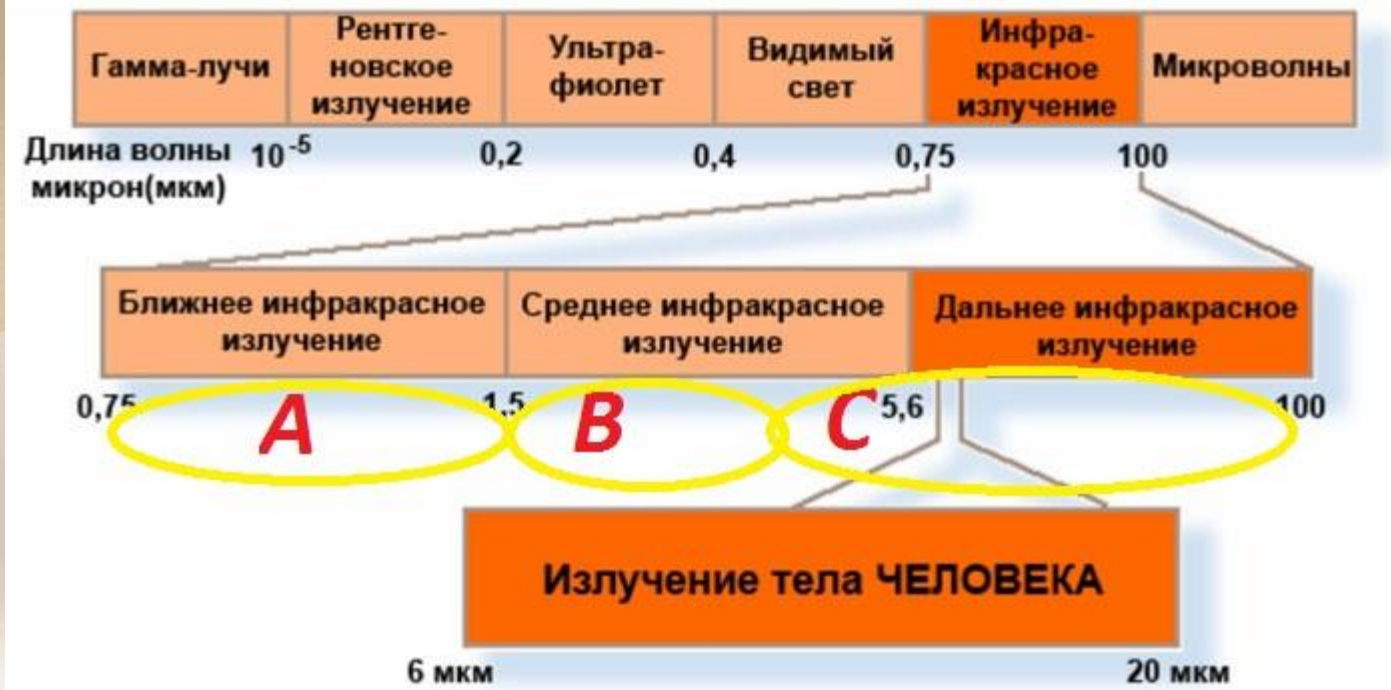
Экранировка теплового излучения

- Мощность теплового излучения P , испускаемого нагретым телом, пропорциональна 4-ой степени абсолютной температуры T_1 и площади его поверхности S .
- Одновременно тело поглощает окружающее излучение среды, которая с температурой T_2 .
- Таким образом, $P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4)$,
- где ε - излучательная способность серого тела;
- σ – универсальная постоянная Стефана-Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ К}^{-4}$).



- Тепловое излучение может поглощаться или проходить в сквозь тело, а также может просто отражаться от тела. Отражение тепловых лучей подобно тому, как если бы световой луч отражался от зеркала. Поглощение теплового излучения подобно тому, как черная крыша сильно нагревается от солнечных лучей. А проникновение или прохождение лучей подобно тому, как лучи проходят в сквозь стекло или воздух.
- Наиболее распространенным в природе видом электромагнитного излучения является тепловое излучение.





- Эффект теплового воздействия ИК-излучений на человека зависит от длины волны, обуславливающей глубину их проникновения.
- Диапазон «А» 0,75-1,5 мкм – называется коротковолновым и обладает наибольшим вредным воздействием.
- Источники тепла, нагретые до 500 °С, содержатся в основном инфракрасные лучи с длинами волн 3-10 мкм. Безопасные. Задача их экранирования связана с формированием тепловых потоков и пожарной безопасностью.

- Высокотемпературные отражающие материалы в первую очередь должны быть долговременно устойчивыми.
- И только во-вторых, обладать наилучшим отражением
- В-третьих, иметь минимальные тепловые деформации.
- Металлические поверхности хорошо отражают ИК-излучение.
- R – коэффициент отражения

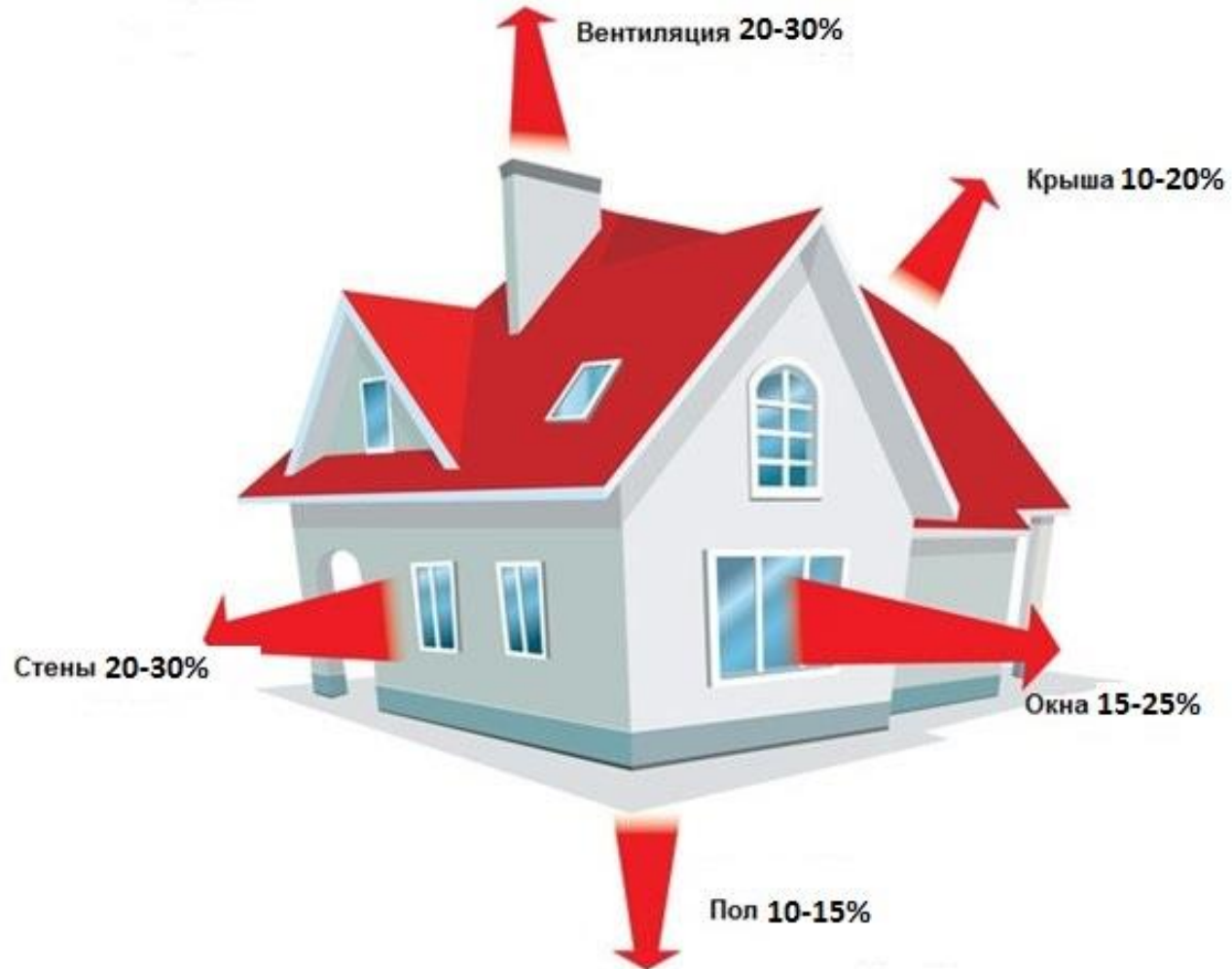
	$\lambda = 0,5 \text{ мкм}$			$\lambda = 5,0 \text{ мкм}$		
	n	κ	R, %	n	κ	R, %
Cu	1,06	2,70	63,2	3,1	32,8	98,9
Ag	0,11	2,94	95,5	2,4	34,0	99,2
Au	0,50	2,04	68,8	3,3	35,2	98,95
Zn	—	—	—	3,8	26,2	97,9
Al	0,50	4,59	91,4	6,7	37,6	98,2
In	—	—	—	9,8	32,2	96,6
Sn	0,78	3,58	80,5	8,5	28,5	96,2
Pb	1,70	3,30	62,6	9,0	24,8	95,0
Ti	2,10	2,82	52,5	3,4	9,4	87,4
Nb	2,13	3,07	56,0	8,0	27,7	96,2
V	2,65	3,33	56,6	6,6	17,5	92,7
Mo	3,15	3,73	59,5	4,25	23,9	97,2
W	3,33	2,96	51,6	3,48	21,2	97,0
Fe	1,46	3,17	63,7	4,2	12,5	90,8
Co	1,56	3,43	65,9	4,3	14,6	92,9
Ni	1,54	3,10	61,6	4,95	18,5	94,8
Pt	1,76	3,59	65,7	7,7	20,2	93,7

Рынок изолирующих материалов

- В настоящее время на рынке строительных материалов в дровяном отоплении для решения одних и тех же задач существует значительный выбор на рынке. Основная архитектурная задача – знание требуемых параметров применяемого материала для создания эффективных конструкций, удовлетворяющих современным нормативам.
- Со знанием тепловых процессов применение материалов в пределах граничных условий – залог правильных строительных решений.
- Вата базальтовая, вата кремнеземная, кальций-силикат природный (волластонит, асбест) и искусственный, вермикулит, шамот, керамика, кирпич глиняный и силикатный – самые распространённые в настоящий момент.

Тепловые потери зданий

Потери тепла в доме, через различные конструкции



- Строительными нормами установлены три показателя тепловой защиты здания:
- а) приведенное сопротивление теплопередаче отдельных элементов ограждающих конструкций здания;
- б) санитарно-гигиенический, включающий температурный перепад между температурами внутреннего воздуха и на поверхности ограждающих конструкций и температуру на внутренней поверхности выше температуры точки росы;
- в) удельный расход тепловой энергии на отопление здания.
- Требования тепловой защиты здания будут выполнены, если в жилых и общественных зданиях будут соблюдены требования показателей "а" и "б" либо "б" и "в". В зданиях производственного назначения необходимо соблюдать требования показателей "а" и "б".

Тепловые сопротивления ограждающих конструкций

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, измеряемое в $(\text{м}^2 \cdot \text{°К})/\text{Вт}$, следует принимать не менее нормируемых значений, в зависимости градусо-суток района строительства.

Нормируемые значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций жилых зданий, лечебно-профилактических и детских учреждений, школ, интернатов, гостиниц и общежитий

Градусо-сутки отопительного периода D_{Δ} °С·сут	Нормируемые значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций $R_{q, min}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$				
	стен	покрытий и перекрытий над проездами	перекрытий чердачных, над неотапливаемыми подпольями и подвалами	окон и балконных дверей, витрин и витражей	фонарей с вертикальным остеклением
2000	2,1	3,2	2,8	0,3	0,3
4000	2,8	4,2	3,7	0,45	0,35
6000	3,5	5,2	4,6	0,6	0,4
8000	4,2	6,2	5,5	0,7	0,45
10000	4,9	7,2	6,4	0,75	0,5
12000	5,6	8,2	7,3	0,8	0,55

Для выделенной климатической полосы сопротивление стены 3,5 $(\text{м}^2 \cdot \text{°К})/\text{Вт}$ соответствует изоляции плотной базальтовой ватой толщиной 135мм, а для клееного бруса – эта толщина составила бы 530мм.

Точка росы

- Температурный перепад °С, между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции не должен превышать нормируемых величин. Это ограничение температуры *против конденсации влаги* на внутренней поверхности ограждающей конструкции.

Здания и помещения	Нормируемый температурный перепад Δt_p , °С, для			
	наружных стен	покрытий и чердачных перекрытий	перекрытий над проездами, подвалами и подпольями	зенитных фонарей
1. Жилые, лечебно-профилактические и детские учреждения, школы, интернаты	4,0	3,0	2,0	$t_{вн} - t_d$
2. <u>Общественные</u> , кроме указанных в поз. 1, административные и бытовые, за исключением помещений с влажным или мокрым режимом	4,5	4,0	2,5	$t_{вн} - t_d$

Температура воздуха, °С	Температура точки росы в °С при относительной влажности воздуха в %										
	45 %	50 %	55 %	60 %	65 %	70 %	75 %	80 %	85 %	90 %	95 %
25	12,2	13,9	15,3	16,7	18,0	19,1	20,3	21,3	22,3	23,2	24,1
24	11,3	12,9	14,4	15,8	17,0	18,2	19,3	20,3	21,3	22,3	23,1
23	10,4	12,0	13,5	14,8	16,1	17,2	18,3	19,4	20,3	21,3	22,1
22	9,5	11,1	12,5	13,9	15,1	16,3	17,4	18,4	19,4	20,3	21,1
21	8,6	10,2	11,6	12,9	14,2	15,3	16,4	17,4	18,4	19,3	20,2
20	7,7	9,3	10,7	12,0	13,2	14,4	15,4	16,4	17,4	18,3	19,2
19	6,8	8,3	9,8	11,1	12,3	13,4	14,5	15,3	16,4	17,3	18,2
18	5,9	7,4	8,8	10,1	11,3	12,5	13,5	14,5	15,4	16,3	17,2
17	5,0	6,5	7,9	9,2	10,4	11,5	12,5	13,5	14,5	15,3	16,2
16	4,1	5,6	7,0	8,2	9,4	10,5	11,6	12,6	13,5	14,4	15,2
15	3,2	4,7	6,1	7,3	8,5	9,6	10,6	11,6	12,5	13,4	14,2
14	2,3	3,7	5,1	6,4	7,5	8,6	9,6	10,6	11,5	12,4	13,2
13	1,3	2,8	4,2	5,5	6,6	7,7	8,7	9,6	10,5	11,4	12,2
12	0,4	1,9	3,2	4,5	5,7	6,7	7,7	8,7	9,6	10,4	11,2
11	-0,4	1,0	2,3	3,5	4,7	5,8	6,7	7,7	8,6	9,4	10,2
10	-1,2	0,1	1,4	2,6	3,7	4,8	5,8	6,7	7,6	8,4	9,2

Расход энергии на отопление

- Удельный (на 1 м² отапливаемой площади пола квартир или полезной площади помещений или на 1 м³ отапливаемого объема) расход тепловой энергии на отопление здания, кДж/(м² · °С · сут) или кДж/(м³ · °С · сут), должен быть меньше или равен нормируемому значению, кДж/(м² · °С · сут) или кДж/(м³ · °С · сут).

Нормируемый удельный расход тепловой энергии на отопление q_h^{req} жилых домов многоквартирных отдельно стоящих и блокированных, кДж/(м² · °С · сут)

Отапливаемая площадь домов, м ²	С числом этажей			
	1	2	3	4
60 и менее	140	-	-	-
100	125	135	-	-
150	110	120	130	-
250	100	105	110	115
400	-	90	95	100
600	-	80	85	90
1000 и более	-	70	75	80

Для разности температур 50 °С на 1 кв м малого дома в 1 этаж
 Потребуется мощность $50 \cdot 140000 / 24 / 3600 = 50 \cdot 140000 / 24 / 3600 = 81$ Вт.

Расчет количества дров на отопление

- Рассматривая дровяное отопление, определение количества дров на обогрев – частая задача.
- Важным моментом перехода от расчетной цифры мощности теплопотерь к определению расхода дров килограмм на сутки является понимание непрерывности теплопотерь помещения днем и ночью. Вследствие чего надо расчет вести от вычисления потери энергии за сутки. А потом уже через теплотворность топлива и КПД аппарата превратить в количество килограммов дров.
- Если насчитано, для примера, дом при морозе теряет энергию со средней скоростью 10 кВт, то надо рассчитывать на потерю 240 кВт*час энергии в сутки. Восстанавливая её потребуется произвести в топке при КПД отопителя 75% 320 кВт*час энергии = $240 / 0,75$. Взяв из таблицы для отличных дров 4,11 кВт*ч/кг, получим делением $320/4,11=78$ кг дров.



- И только следующий этап – выбор самого аппарата. Или системы аппаратов.
- Паспортные данные каминов и печей чаще всего охарактеризованы номинальной мощностью.
- При выборе каминов следует помнить, что отопление продолжается не более $\frac{3}{4}$ суток, поэтому при скорости теплопотерь дома 10 кВт номинальная мощность каминов должна составить не менее $10 / (\frac{3}{4}) = 13,3$ кВт. Это для того, чтобы аппарат мог обеспечить запас энергии в стенах дома. Конечно, для слабо утепленных домов, такая методика не поможет – запас быстро будет таять и потребуются топить ночью как и днем.