

1. Горение древесины

Рукотворный костер появился в жилищах древних людей более миллиона лет назад. Но сам *Homo sapiens* /человек разумный/ появился лишь 50-100 тысяч лет назад. Это означает, что освоение огня началось “диким образом” фактически “обезьяночеловеками” задолго до появления “разума” и древнейших цивилизаций.

Сейчас огонь уже давно перестал быть явлением непостижимого таинства. Огонь в печи ныне квалифицируется современными людьми как вполне обыденное, понятное и знакомое явление. Чаще всего воспринимается даже как образ уюта в доме.

Но до сих пор печники почему-то не очень стремятся обсуждать, почему и каким образом горят дрова в печи. Не любят об этом писать и в книжках. Раз горят дрова в топке, ну и пусть, мол, горят. Вместе с тем, печники охотно обсуждают, хорошо или плохо разгораются и горят дрова в той или иной печи.

Но какую физическую смысловую суть содержат расхожие слова - “дрова хорошо горят” или “легко сгорают”? На этот до наивности простой вопрос даже опытные печники порой не дают вразумительного ответа. Потому, что фраза о “хорошем сгорании” зачастую выступает скорее как эмоциональное понятие /типа “дружного горения”/, нежели как технический термин.

1.1. Химия процесса

Говоря о горении древесины, мы в первую очередь ассоциируем огонь с языками пламён над дровами. А языки пламени, как мы знаем с детства, бывают от горящих газов. Но ведь дрова в поленице не выделяют никаких горючих газов. Дрова - это лишь топливо /“сырье”/, из которого еще предстоит получить “горючее”, которое можно сжечь.

Горючие газы /в виде паров горючих жидкостей/ выделяются из древесины, раскаленной “в огне”. Так что первейшей задачей истопника является обеспечение нагрева древесины до появления горючих газов. А потом уже достаточно просто “чиркнуть спичкой”.

1.1.1. Газификация и горение

Технологический принцип “сначала нагреть - потом поджечь” широко известен для многих видов жидких и твердых топлив.

Так, например, обычный осветительный керосин марки ОК-25 /цифра указывает высоту не коптящего пламени/ невозможно поджечь спичкой при низких температурах [1]. Лишь при нагреве керосина до (40-49)°С мы сможем увидеть при поджиге кратковременную вспышку над поверхностью жидкости /рис. 1/.

Отсутствие вспышки при низких температурах объясняется тем, что воспламенение и горение керосина в виде пламени возникает отнюдь не в жидкости, а именно в парах жидкости, точнее, в смеси горючих паров с воздухом. Пламя может развиваться лишь при концентрациях /парциальных давлениях/ горючих паров в воздухе, превышающих некое минимальное значение концентрации горючих паров в воздухе [2]. Это минимально необходимое значение концентрации называется нижним концентрационным пределом распространения пламени НКПРП, равным, в частности, 0,9% об. для керосина ОК-25. Отметим для ясности, что ранее НКПРП назывался НКПВ - “нижним концентрационным пределом воспламенения” горючих газов или паров /а еще раньше “пределом воспламеняемости”, а еще раньше “пределом взрываемости”/.

Так что при низких температурах керосин не вспыхивает из-за того, что над жидкостью нет достаточного количества горючих паров кероси-

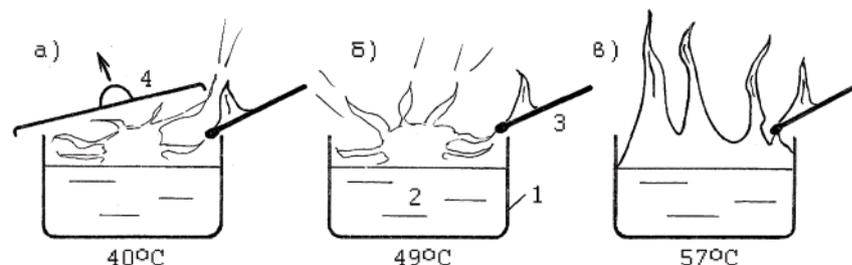


Рис.1. Пояснение понятий вспышки и воспламенения горючих жидкостей: а - налитый в баночку 1 керосин 2 может кратковременно вспыхнуть от внешнего источника зажигания 3 /спички, горелки, искры/ лишь при температуре жидкости выше 40°С и лишь при наличии крышки 4 /“вспышка в закрытом тигле”/, б - при температуре жидкости выше 49°С керосин может кратковременно вспыхнуть и без крышки 4 /“вспышка в открытом тигле”/, в - при температуре жидкости выше 57°С керосин после вспышки продолжает гореть пламенем /“воспламенение керосина”/.

на. При нагреве же жидкости, равновесное давление паров керосина быстро повышается, и при достижении НКПРП горючие пары при поджиге могут вспыхнуть пламенем.

В любом случае под вспышкой мы будем понимать явление именно кратковременного воспламенения от внешнего источника зажигания, поскольку при указанных температурах жидкого керосина (40-49)°С, пламя вспышки, достигнув поверхности жидкости, самопроизвольно гаснет. Самозатухание пламени происходит из-за того, что все присутствующие пары сгорают, а новые порции паров не успевают поступить в воздух с необходимой для непрерывного горения скоростью /из-за недостаточной скорости испарения керосина/. И только при температуре жидкого керосина выше 57°С /называемой температурой воспламенения керосина/ можно добиться в результате вспышки устойчивого самостоятельного горения керосина “в плоске”.

Так что керосин - это топливо. А горючим /реагентом/ являются пары керосина, причем не любые пары, а пары определенной плотности. Подобные свойства горючих жидкостей использованы для категорирования пожарной опасности веществ и материалов по ГОСТ 12.1.044-89.

Вышеописанные явления воспламенения происходят при наличии достаточно горячего и мощного внешнего источника воспламенения-зажигания-поджига /искры, спички, пламени/. При отсутствии внешнего источника воспламенения керосин благополучно закипает на воздухе при 189°С без воспламенения. Но если пары керосина /или паровоздушную смесь/ дополнительно искусственно нагреть до 236°С, то пламя возникнет самопроизвольно и при отсутствии внешнего источника воспламенения. Такое явление самопроизвольного воспламенения называется самовоспламенением. Так, бензиновые двигатели внутреннего

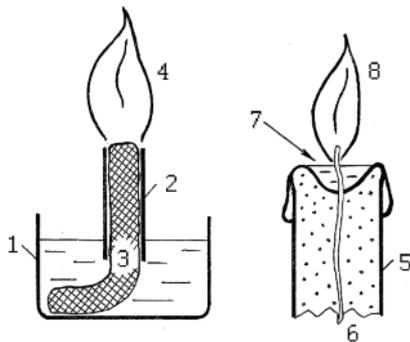


Рис.2. Устройства для сжигания жидких и твердых веществ с местным нагревом горючего вещества за счет тепла пламени: а - керосиновая /масляная/ лампа /лампада/, б - стеариновая /парафиновая, восковая/ свеча. 1 - баночка с горючей жидкостью, 2 - металлическая трубка, направляющая и вертикально удерживающая фитиль и предотвращающая проскок пламени к поверхности горючей жидкости, 3 - тканый хлопчатобумажный фитиль, 4 - коптящее пламя, 5 - стеарин /парафин, воск/, 6 - хлопчатобумажная фитиль-нитка, 7 - расплав стеарина, 8 - некопящее пламя.

сгорания работают от воспламенения горючей смеси /от“принудительного поджига искрой”/, а дизельные двигатели на “солярке” /керосине/ работают от самовоспламенения горючей смеси при ее быстром саморазогреве от механического сжатия в цилиндре двигателя.

В аппаратах освещения или отопления в целях безопасности используют местный нагрев керосина до температур воспламенения, например, с помощью фитиля в керосиновых лампах /рис.2/. При этом основной запас керосина остается в относительно “безопасном” холодном состоянии. Аналогичные явления происходят и в стеариновых /или парафиновых/ свечах освещения, и в церковных лампадах на “деревянном” /оливковом/ масле. Во всех этих случаях разогрев новых порций горючих жидкостей в фитиле до температуры воспламенения осуществляется за счет тепла от пламени.

Таким образом, мы видим, какие сложные закономерности приходится учитывать при, казалось бы, простейших случаях воспламенения керосина на открытом воздухе. А при воспламенении древесины эти особенности еще более сложные. Поскольку горючих жидкостей, которые способны испаряться в виде паров, в исходных дровах нет - они образуются лишь при нагреве поленьев.

1.1.2. Строение и свойства древесины

Химический состав древесины различен в коре /лубе/, в сердцевине /ядре/ и в промежуточных слоях /заболони/, причем в каждой зоне древесины состоит из множества различных веществ [3]. Так, кора березы содержит много смолистых веществ и считается сильнодымящей /из нее раньше вырабатывали смазывающее вещество - деготь/. А заболонь березы содержит мало смолистых веществ и считается слабодымящей /из нее, в частности, изготавливают малозольные высокопористые древесные угли для противогазов/.

Все деревья прирастают от камбия - тонкой зоны между заболонью и лубом, где в период вегетации /весна - осень/ рождаются новые растительные клетки древесины, образуя годичные слои, видные на спиле ствола. Эти растительные клетки имеют сильно удлинненную вдоль ствола волоконноподобную форму /длиной 1-6 мм и диаметром в сто раз меньшим/ и заполнены жидкой водосодержащей цитоплазмой /рис. 3/. Между рядами клеток могут находиться разного рода включения, в том числе смоляные ходы [4].

По мере взросления клетки “умирают” из-за возникновения большого количества “перфораций” - отверстий-дырочек в стенках клеток. В

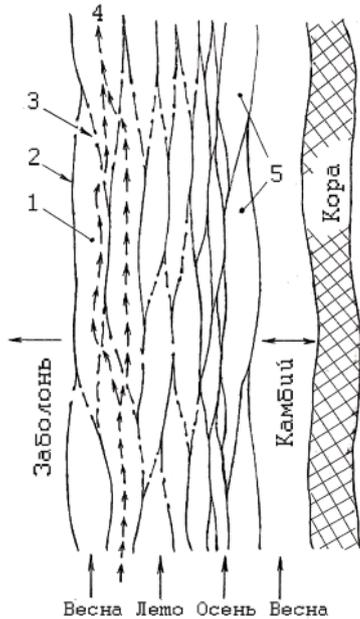


Рис.3. Упрощенная схема пористой структуры древесины: 1 - клетки /в заболони - мертвые, лишенные цитоплазмы поры/, 2 - микропористые стенки /оболочки/ клеток, 3 - перфорации /отверстия/ в микропористых стенках клеток, 4 - ход влаги в трахеидах, 5 - рождующиеся в камбии клетки.

результате в стволе образуются вертикальные сквозные каналы, так называемые трахеиды /сосуды/, способные подавать водные растворы от корня дерева к листьям. При сушке древесины вода из трахеид испаряется, и возникают трубчатые пустоты /поры/, разделенные материалом клеточных стенок.

Клеточные стенки состоят из прочного на разрыв древесинного вещества, формируемого целлюлозными фибрилами - пучками волокон из длинных полимерных молекул целлюлозы.

Пространства между фибрилами заполнены гемицеллюлозой /короткими цепями целлюлозы/, аморфным полимером-лигнином и влагой. При сушке стенок клеток влага между фибрилами удаляется с образованием микроскопических пустот /микропор-микрокапилляров, как у "промокашки"/. При этом древесина уменьшается в размерах /"стягивается"/, как говорят, "усушивается" /"дает усадку"/ преимущественно в поперечном направлении [6].

В результате высушенная древесина приобретает воздушно-пористую структуру типа "трубок с пористыми стенками". Поэтому газопроницаемость /и паропроницаемость/ высушенной древесины вдоль волокон /вдоль ствола/ является намного более высокой, чем поперек волокон, например, для сосны соответственно 0,32 и 0,06 мг/м.час.Па. Общая пустотность /пористость/ сухой древесины может достигать 50 - 70% об. Кажущаяся плотность абсолютно сухой сосны /отношение массы полен на его объем во внешних габаритах/ составляет 300 - 700 кг/м³ /в среднем 500 кг/м³/, а березы 500 - 700 кг/м³ /в среднем 630 кг/м³/. Истинная же плотность /пикнометрическая/ материала абсолютно сухого древесинного вещества клеточных стенок практически одинакова для всех пород древесины 1540 кг/м³ [5].

Микропоры /микрокапилляры/ древесинного вещества клеточных стенок способны конденсировать пары воды непосредственно из воздуха /из-за повышения температуры кипения воды в микрокапиллярах/. Такое свойство "высасывать" влагу из воздуха называется гигроскопичностью. В результате, если при сушке поверхность непористого материала /например, стали или мрамора/ становится совершенно сухой, то "высушенная" гигроскопическая древесина может сохранить некоторую конкретную равновесную влажность [6]. При снижении относительной влажности воздуха или при повышении температуры равновесная /то есть рано или поздно устанавливающаяся/ влажность древесины снижается /рис. 4-6/.

Гигроскопическая влажность древесины полностью обратима и изменяется /пусть и медленно/ с изменением относительной влажности воздуха в соответствии с вышеприведенными кривыми равновесной влажности. Так, высушенная на улице древесина будет дополнительно высушиваться при перемещении в отапливаемое помещение /с усушкой - уменьшением размеров/ и, наоборот, высушенная в помещении древесина будет увлажняться при перемещении на улицу /с разбуханием/. Отметим, что пропарка в чистом водяном паре /при 100°C и 100%-ной влажности воздуха/ приводит к сушке сырой древесины до относительной влажности около 20%.

Под относительной влажностью древесины w будем понимать отношение массы влаги в древесине к массе абсолютно сухой древесины /подчеркиваем потому, что в литературе имеется также и другое определение относительной влажности древесины W как отношение массы влаги в древесине к общей массе сырой древесины/.

Под относительной влажностью воздуха будем понимать отношение парциального давления водяных паров в воздухе к давлению насыщенных паров воды при заданной

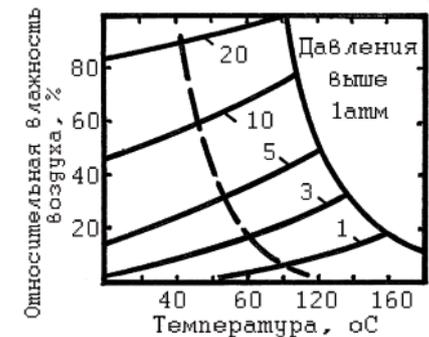


Рис.4. Равновесная влажность древесины. Графики показывают температурную зависимость относительной влажности воздуха в условиях равновесия воздуха с древесиной определенной влажности. Цифры на кривых - численные значения равновесной относительной влажности древесины. Пунктирная кривая соответствует банному климату с абсолютной влажностью воздуха 50 г/м³ /то есть точкой росы воздуха 40°C/.

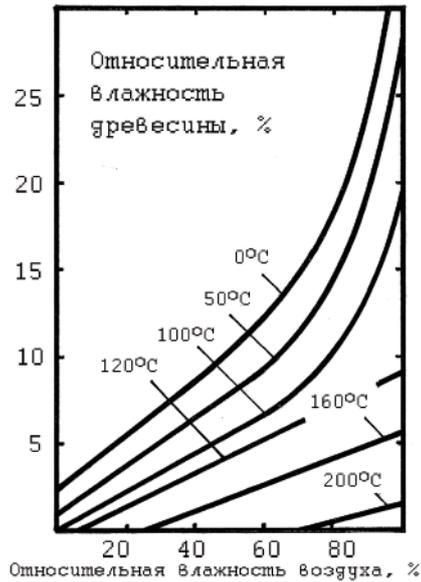


Рис.5. Равновесная влажность древесины. Графики показывают, как изменяется равновесная относительная влажность древесины при изменении относительной влажности воздуха при различных температурах. Цифры на кривых - численные значения температуры воздуха, равной температуре дров.

температуре /рис.7/. Величина относительной влажности воздуха удобна тем, что легко измеряется простыми приборами с гигроскопической нитью, удлиняющейся при увлажнении.

Древесина с водой, размещенной только в клеточных стенках, называется влажной /хотя на вид она может казаться сухой/. Такая древесина является гигроскопической. Вода внутри клеточных стенок называется "влажностью". Полное насыщение влагой микрокапилляров клеточных

стенок достигается при относительной влажности древесины около 30%.

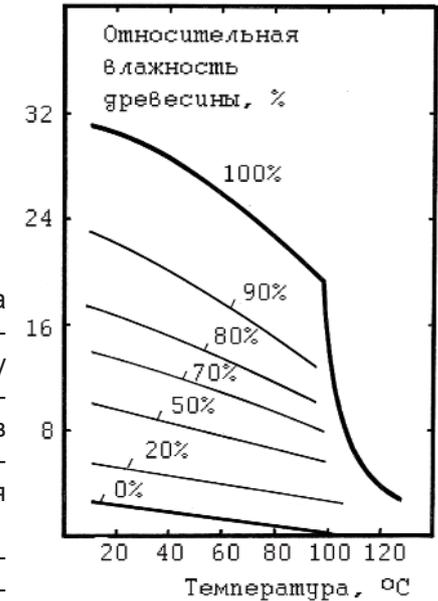
Древесина с наличием воды внутри клеток /трахеид/ называется сырой. А сама вода в клетках /в трахеидах/ условно называется "сыростью".

Древесина же с полностью насыщенными водой внутренними порами и с наличием воды на своей поверхности называется мокрой. Соответственно, вода на поверхности древесины условно называется "мокротой".

Для ориентировки напомним, что относительная влажность свежесрубленной древесины составляет 50-100%. Древесина, высушенная "на улице", имеет равновесную относительную влажность 15-30% /атмосферно-сухая товарная древесина/. При сушке в жилом помещении древесина приобретает относительную влажность 8-15% /комнатно-сухая строительная древесина/, а при сушке в термокамере 4-8% /мебельно-сухая древесина/. Мебельно-сухая древесина может стать атмосферно-сухой при перемещении на улицу /и наоборот/.

В то же время, древесина, выдержанная долгое время в воде, набухает до влажности 260% и более /топляк/, приобретает со временем особые необратимые свойства /мореная древесина/, частности, высокую твердость из-за модификации смол. А прогретая водяным паром до 200-240°C /паростабилизированная/ или вываренная под давлением

Рис.6. Равновесная влажность древесины. Графики показывают, как изменяется равновесная относительная влажность древесины при изменении температуры при различных относительных влажностях воздуха. Цифры на кривых - численные значения относительных влажностей воздуха.



/например, в креозоте/ древесина необратимо превращается фактически в "не живую" пластмассу /полисахарид/ с низкой гигроскопичностью, не подверженную, в частности, биологическому гниению /видимо, из-за разрушения гемицеллюлозы/.

Отметим, что численные значения теплофизических свойств древесины сильно разнятся в различных литературных источниках ввиду "натуральности" материала и могут отклоняться от стандартизованных величин по СП 23-101-2000 "Проектирование тепловой защиты зданий". Удельная теплоемкость древесины не зависит от породы деревьев и при 20°C составляет 1,8 - 2,0 кДж/кг.град для сухой и 2,6 - 3,0 кДж/кг.град для свежесрубленной древесины. Теплопроводность древесины зависит от породы деревьев и увеличивается с повышением кажущейся плотности древесины. Для сосны при 20°C теплопроводность поперек волокон составляет 0,15 - 0,19 Вт/м.град для сухой и 0,28 - 0,33 Вт/м.град для свежесрубленной древесины /и 0,29 Вт/м.град для сухой сосны вдоль волокон/.

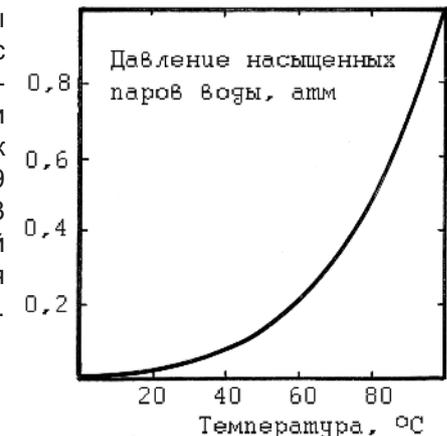


Рис.7. Давление насыщенных паров воды при различных температурах.

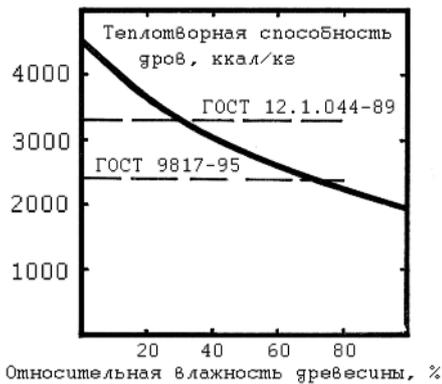


Рис.8. Снижение теплотворной способности /"калорийности"/ древесины при повышении ее относительной влажности w /понимаемой как отношение массы влаги в древесине к массе абсолютно сухой древесины/. Пунктирными горизонтальными прямыми указаны стандартизованные значения теплотворной способности дров по ГОСТ 12.1.044-89 "Пожароопасность веществ и материалов" /отвечающие влажности дров 30%/ и ГОСТ 9817-95 "Аппараты бытовые, работающие на твердом топливе" /отвечающие влажности дров 70%/.

Коэффициент линейного термического расширения сухой древесины вдоль волокон составляет $(2,5 - 5,4) \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, а поперек волокон на порядок выше [5].

Теплотворная способность при сгорании в воздухе абсолютно сухой древесины различных пород практически одинакова $4500 \text{ ккал/кг} = 18900 \text{ кДж/кг} = 5,2 \text{ кВт.час/кг}$ /при отсутствии конденсации водяных паров/ и $4800 \text{ ккал/кг} = 20160 \text{ кДж/кг} = 5,6 \text{ кВт.час/кг}$ /при конденсации водяных паров/. Теплотворная способность древесного топлива сильно зависит от относительной влажности конкретных дров /рис. 8/.

1.1.3. Химический состав древесины

Элементный массовый состав абсолютно сухой древесины /абсолютно сухого древесинного вещества оболочек клеток/ всех пород древесины примерно одинаков: углерод 49-50%, кислород 42-44%, водород 6-7%, неорганическая часть 0.1-2% /зола, состоящая из окислов калия, кальция, натрия, магния, кремния и т.п./.. Древесина содержит также 0,1 - 1% связанного азота - именно такой "древесинный" азот может образовывать вредные выбросы окислов азота при газификации и горении древесины /атмосферный азот во взаимодействии с кислородом при печных температурах не вступает/.

Перечисленные химические элементы создают в древесине три основные группы химических соединений типа натуральных полимеров: целлюлозу 39-58%, гемицеллюлозу 15-38% и лигнин 17-34% /и до нескольких процентов восков, смол, танинов, жиров, эфирных масел, которые не оказывают заметного влияния на печные явления/.

Целлюлозные вещества являются волокнообразующим материалом клеток, придают гибкость древесине и прочность на разрыв. Напомним, что хлопок представляет собой фактически чистую целлюлозу. Целлюлозы представляют собой линейные полимеры-полисахариды с гибкой цепной структурой. Полисахариды относятся к углеводам, то есть формально их состав можно описать суммой углерода С и воды H_2O /рис. 9/. Так, формальная формула целлюлозы имеет вид $[\text{C}_6(\text{H}_2\text{O})_5]_m$ при длине цепи порядка $m = 10000$.

Формальная формула гемицеллюлозы складывается из звеньев "пентозной" и "гексозной" составляющих полимера $[\text{C}_5(\text{H}_2\text{O})_4]_n + [\text{C}_6(\text{H}_2\text{O})_5]_k$. Длины цепей гемицеллюлоз n и k достигают 200. Плотности целлюлоз и гемицеллюлоз порядка $1500\text{-}1600 \text{ кг/м}^3$.

Лигнин - аморфный полимер ароматической природы, волокон не образует. Плотность лигнина $1250\text{-}1450 \text{ кг/м}^3$. Лигнин образуется в оболочках клеток позднее /через несколько дней после образования и отделения клетки от камбия/ и придает растительной ткани наземной флоры свойства твердости, упругости и фиксации формы /явления одревеснения/. Так, если молодую ветку намотать на палку и вынудить ее расти в таком состоянии, то ствол ветки постепенно затвердеет и зафиксируется лигнином в форме спирали навсегда. Водоросли же, мхи и грибы лигнина не содержат.

Считается, что термолиз древесины начинается с разрушения гемицеллюлоз /из-за высокой дефектности коротких полимерных цепей/, а именно с пентозных частей гемицеллюлоз /рис. 9/. При этом древесина начинает буреть уже при $160\text{-}180^\circ\text{C}$. Поэтому специальное удаление химически нестойких гемицеллюлоз может заметно повышать огнестойкость древесины.

Целлюлоза же начинает разлагаться /буреть/ при $220\text{-}240^\circ\text{C}$, поэтому утюги для целлюлозных хлопчатобумажных тканей и регулируют на

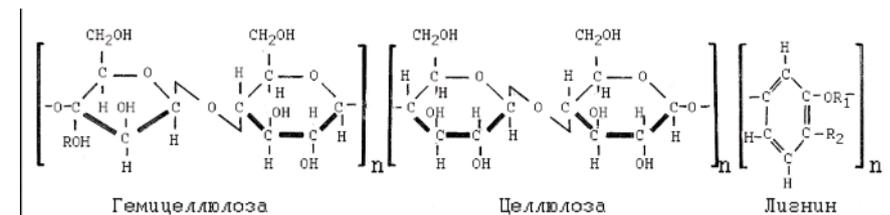


Рис.9. Химическая структура основных компонентов древесины.

эти температуры. При 275°C целлюлоза начинает саморазогреваться за счет экзотермического распада и в больших массах может самовоспламениться. При 400-450°C образуется целлюлозный уголь.

Лигнин, обладая ароматическим строением, более устойчив к термолизу, чем целлюлоза и начинает разлагаться лишь при 350-450°C. Продукты термолиза лигнина содержат большое количество смол, выделяющиеся газы состоят из CO /до 50%/ , метана /до 38%/ , CO₂ /около 10%/ . Лигнин образует в полтора раза больше углей и в два раза больше смол, чем целлюлоза [5].

1.1.4. Термическое разложение древесины

При нагреве без доступа воздуха происходит термическое разрушение древесины /термолиз, пиролиз/ с выходом разнообразных паров и газов /так называемых “летучих”/. Такой процесс в лесохимических производствах называется “сухой перегонкой”.

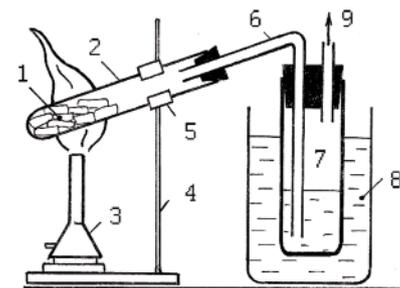
Сухая перегонка древесины осуществляется в обогреваемых ретортах /рис. 10/. Сначала при 100-150°C из древесины испаряется свободная /из объема клеток/, а затем и гигроскопическая /из стенок клеток/ вода. Затем при 150-275°C постепенно начинается разложение древесины с потреблением тепла и выделением водных растворов органических кислот, спиртов, ацетона, а также газов двуокиси углерода CO₂ /углекислого газа/ и окиси углерода CO /угарного газа/ в соотношении примерно 2 : 1.

При температурах 275-450°C происходят главные реакции распада веществ древесины, причем с бурным выделением теплоты /с саморазогревом древесины/. При этом содержания CO₂ и CO снижаются, появляются водород и углеводороды в виде фенолов, смол и масел и т.п. Наконец, при температурах 450-500°C происходит последняя стадия термолиза с выделением газообразных углеводородов и водорода, требующая подвода тепла извне и заканчивающаяся образованием древесного угля [7].

Выход газов, жижки и углей на производстве обычно составляет соответственно по массе 15%, 52%, 33% для березы и 18%, 44%, 38% для сосны [7].

Жижка разделяется на верхний “водный слой” /растворы уксусной кислоты, метилового спирта, ацетона и др./ и нижний “смоляной слой”, из которого производят, в частности, деготь - смазочное вещество, креозот - антисептик для железнодорожных шпал, а также компоненты углеводородных топлив и растворители, грубо говоря, типа скипидара.

Рис.10. Прибор для изучения сухой перегонки /термолиза/ древесины: 1 - образец измельченной древесины, 2 - реторта /пробирка/, 3- газовая горелка, 4 - штатив, 5 - держатель реторты, 6 - трубка для отвода паров и газов, 7 - пробирка-холодильник для сбора конденсата, 8 - хладагент /вода со льдом/, 9 - отвод газов на химанализ.



Приведем для сведения состав химических веществ, получаемых при сухой перегонке абсолютно сухой древесины и ее компонентов в % масс:

Продукты сухой перегонки	Береза сухая	Сосна сухая	Целлюлоза сосны	Лигнин сосны
Уголь древесный	34,6	41,1	36,9	50,6
Газы:				
CO ₂	10,8	11,0	12,8	1,70
C ₂ H ₄	0,21	0,25	0,21	0,40
CO	3,61	4,07	3,40	9,40
CH ₄	0,59	0,64	0,27	6,90
Метиловый спирт	1,74	0,96	следы	0,90
Ацетон	0,21	0,20	0,08	0,20
Метилацетат	0,02	0,01	следы	следы
Уксусная кислота	7,70	3,80	2,18	1,10
Смола /деготь/	8,62	12,8	4,85	13,0
Прочие органические вещества	8,86	8,72	4,22	-
Вода	21,5	15,5	34,1	15,8

Взятая для этих опытов древесина содержала 7-9% влаги [8]. Поэтому для таблицы был произведен соответствующий арифметический пересчет на абсолютно сухую древесину в предположении отсутствия реакций компонентов древесины с водяными парами при температурах ниже 200°C /хотя это и не совсем корректно/. Тем не менее, в результате сухой перегонки выделилось до 22% воды. Так что даже абсолютно сухая древесина образует при термоллизе воду в ходе химических реакций разложения древесины. А вода, в свою очередь, способствует перегонке органических веществ.

По другим данным, неконденсирующиеся газы содержат в среднем за процесс 43 - 46% CO₂, 29 - 33% CO, 1,9 - 2,3% водорода, 2,2 - 3,7% непредельных углеводородов, 17 - 22% метановых углеводородов [4].

Целлюлоза и лигнин выделялись из древесины сосны химически, так что могли отличаться по составу от натуральных компонентов в древесине [9].

Фракционный состав продуктов сухой перегонки сосновой древесины [10]:

Фракция	150-200°C	200-280°C	280-380°C	380-500°C	500-700°C	700-900°C
Содержание углерода в угле, % масс	60	68	81	84	84	91
Газы: CO ₂	68	66,5	35,5	31,5	12,2	0,4
CO	30,5	30	20,5	12,3	24,5	9,6
H ₂	0	0,3	5,5	7,5	42,7	80,7
C _k H _n	2	3,3	36,5	48,7	20,4	8,7
Конденсат /условно/	вода	вода	спирты	масла	смолы	мало
Калорийность газа, кДж/м ³	4,61	5,07	16,42	20,03	15,21	13,24

При сухой перегонке всегда образуются древесные угли в количестве до 35-45% от массы абсолютно сухой древесины. Поэтому процесс сухой перегонки иногда называют “углежжением” /“углевыжиганием”/.

Уголь, образующийся при сухой перегонке до 500°C содержит до 25% примесей кислорода, водорода и азота, так что при дополнительном прокаливании можно выделить из такого “угля” еще до 35-40% летучих от массы угля. При ведении процесса углежжения при более высоких температурах можно существенно снизить примеси в углях. Так, при сухой перегонке в окислительной среде при 600°C в печах или засыпанных тлеющих кострах / по-существу, в газогенераторах, см. далее/ количество летучих в углях можно снизить до 5-10%, но за счет уменьшения выхода углей до 30%, а при применении подачи влаги до 20%.

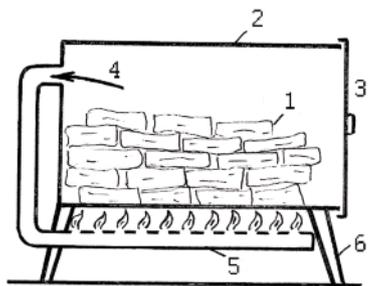


Рис.11. Аппарат для сухой перегонки древесины /углежжения/: 1 - закладка древесины /в виде дров по ГОСТ 3243-88 из пород древесины для углежжения по ГОСТ 24260-80, дровяных отходов по ГОСТ 23827-79 или горбыля-тонкомера по ГОСТ 18288-87/, 2 - корпус реактора стальной /бочка/, 3 - герметично закрывающаяся крышка, 4 - отвод горячих газов и паров, 5 - трубчатая газовая горелка для сжигания горючих газов и паров в целях нагрева корпуса реактора, 6 - ножки реактора. Запуск аппарата осуществляется первичным прогревом реактора снизу факелом или костром.

Напомним, что в соответствии с ГОСТ 6382-2001 “Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ” / ISO 562/ твердые топлива проверяются на выход летучих при прокаливании образца до 900°C в муфельных печах. При такой методике выход летучих из древесины составляет порядка 85% /от массы абсолютно сухого образца/, а выход твердого остатка в виде древесных углей соответственно порядка 15%, включая золу. Древесная зола /пепел/ не летуча, имеет температуру плавления 1200-1400°C.

В ряде случаев /например, при использовании в газогенераторных автомобилях/ важную роль играет прочность образующегося древесного угля /чтобы он не крошился при тряске автомобиля/. Наиболее твердый древесный уголь дают твердые породы деревьев /береза, бук, граб, ясень, клен, лиственница/. Относительная прочность древесного угля от мягких пород деревьев заметно более низкая - например, от березы 1,00, сосны 0,58, осины 0,46, ели 0,43, пихты 0,39. Низкопрочный древесный уголь крошится при шуровке и повышает газодинамическое сопротивление колосниковой решетки топki.

1.1.5. Газификация древесины и углей

Вышеописанный процесс “сухой перегонки” осуществляется в нагреваемых беспроточных реакторах-ретортах типа перегонного куба /баках с водоохлаждаемым конденсатором-холодильником/, в том числе с целью углежжения с использованием нагрева от сжигания горючих газов термолиза /рис.11/. В лесохимии практикуют и другие виды перегонки древесины, например, в условиях протока газов через реторту - в окислительной среде воздуха или в восстановительной среде углеводородов. При этом состав продуктов перегонки, естественно, изменяется [8].

Для печников практический интерес представляет перегонка древесины при непрерывной подаче в реторту воздуха. Дело в том, что при температурах выше 275-450°C начинается интенсивный саморазогрев древесины за счет разложения целлюлозы. При наличии кислорода продукты термолиза древесины могут воспламеняться.

Напомним, что воспламенение - это не просто быстрое окисление. Воспламенение - это скачкообразный “разгон” скорости окисления за счет резкого саморазогрева окисляемой древесины с температур 275-450°C до температур горения /см. далее разделы 1.2 и 1.3/. Воспламенение создает условия для горения - для процесса сверхбыстрого протекания реакций окисления с большой мощностью выделения тепла, что обеспечивает самоподдерживаемое термическое раз-

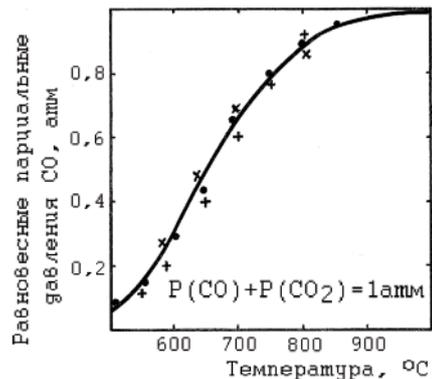


Рис.12. Результат термодинамического расчета состава продуктов реакции $C+CO_2=2CO$ над углеродом. Сплошная кривая - по исходным данным [14], черные точки [8], крестики [15], наклонные крестики [16]. Здесь и далее $p(CO)$ и $p(CO_2)$ - парциальные давления компонентов смеси CO и CO_2 соответственно.

ложение древесины. Фактически мы имеем процесс термоллиза в реторте за счет тепла от сжигания отходящих газов /рис.11/, но при

сжигании газов внутри самой реторты.

Такие термолитические аппараты с протоком воздуха называются газогенераторами. Главной потребительской особенностью газогенераторов является то, что можно реализовать режимы полной газификации древесины с переводом всего угля в горючие газы [11]. Это достигается за счет реакции неполного окисления углерода $C + 0,5 O_2 = CO + 29430$ ккал/моль с получением так называемого "суховоздушного газа" /смеси окиси и двуокиси углерода с азотом/. При наличии достаточного количества кислорода идет также реакция полного окисления углерода в двуокись углерода $C + O_2 = CO_2 + 97650$ ккал/моль.

Вообще говоря, эксперименты по окислению углерода в вакууме показали, что первичным продуктом окисления углерода является твердый углеродно-кислородный комплекс C_xO_y , который затем распадается на окись углерода CO и двуокись углерода CO_2 по реакции $3C + 2O_2 = 2CO + CO_2$ [12]. Однако на практике объемное соотношение CO/CO_2 ,

равное 2, практически никогда не реализуется, во-первых, из-за реакции окисления окиси углерода $CO + 0,5 O_2 = CO_2 + 68220$ ккал/моль, а во вторых, из-за реакции восстановления двуокси-

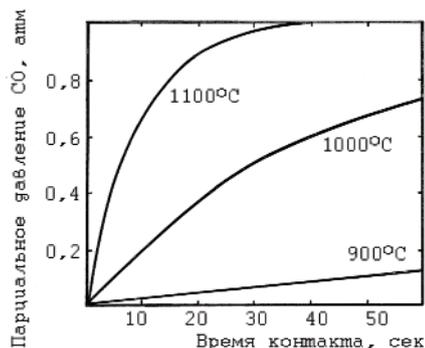


Рис.13. Темп восстановления двуокиси углерода CO_2 над углем в ходе реакции $C+CO_2=2CO$ при различных температурах при общем давлении газовой фазы $p(CO)+p(CO_2)=1$ атм [8].

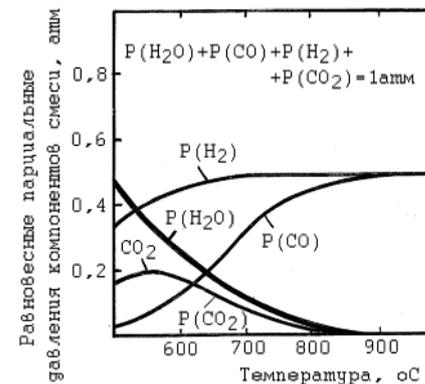
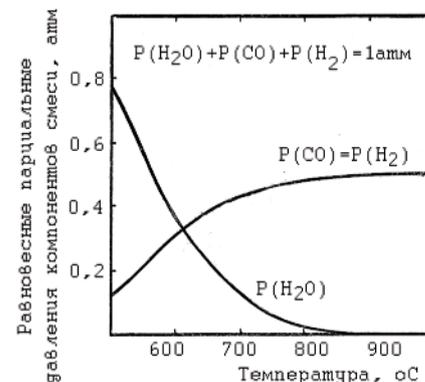
Рис.14. Результат термодинамического расчета состава продуктов реакции углерода с водяными парами по исходным данным [14]. Без учета образования CO_2 .

си углерода $C + CO_2 = 2CO - 38790$ ккал/моль.

На практике для оценки топочных явлений часто руководствуются термодинамическим расчетом состава смесей CO и CO_2 над углем - чистым твердым углеродом /рис. 12/. Получающийся равновесный состав бескислородной среды $CO+CO_2$ над углем отвечает бесконечно долгому контакту указанных газов с углем [13-16]. Расчет различных авторов показывает, что реакция восстановления двуокиси углерода углем может начинаться термодинамически уже при $500^\circ C$. При $900^\circ C$ и выше весь окисленный углерод в бескислородной среде над углем при атмосферном давлении находится в виде окиси углерода /рис.12/. В реальных топливных процессах сумма парциальных давлений CO_2 и CO всегда существенно меньше единицы. Поэтому относительный выход CO обычно еще выше, поскольку термодинамическое равновесие $p(CO_2)=K_1(T)p^2(CO)$ при снижении парциальных давлений компонентов сдвигается в сторону образования CO /здесь $K_1(T)$ - табличное значение константы термодинамического равновесия реакции/.

При этом следует иметь в виду, что скорость конверсии CO_2 в CO над углем не велика /рис.13/. Сама же молекула CO при низких температурах вполне устойчива. Так, реакция окисления окиси углерода воздухом $CO + O_2$ даже при $700^\circ C$ идет только в присутствии хотя бы следовых количеств влаги /см. раздел 5.9.4/.

Рис. 15. Результат термодинамического расчета состава продуктов реакции углерода с водяными парами по исходным данным [14]. С учетом образования CO_2 .



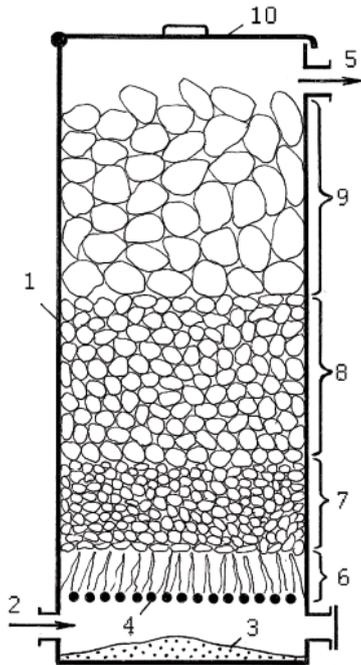


Рис. 16. Схема газогенератора с прямым процессом газификации [8] : 1 - корпус-бункер, 2 - подача воздуха вентилятором /компрессором/ розжига, 3 - зольник, 4 - решетка колосниковая, 5 - вывод генераторного газа потребителю, 6 - зона горения, 7 - зона восстановления, 8 - зона сухой перегонки, 9 - зона подсушки, 10 - герметично закрывающаяся крышка. Аппарат работает на кусковом древесном угле или на древесных чурках, изображенных на рисунке разного размера для наглядности условного разделения всей топливной закладки на технологические зоны горения, перегонки и подсушки. Часто зону горения и зону восстановления условно объединяют в единую, так называемую "активную зону", формирующую состав окислов углерода.

Огромную роль в процессах газификации углей играет реакция восстановления воды над углем с образованием так называемого "водяного газа" /синтез-газа/ по формуле $C + H_2O = CO + H_2 - 28800 \text{ ккал/моль}$. Эта реакция также требует затрат тепла, но зато

может преобразовывать пассивную воду в горючий газ [17]. Расчет показывает, что образование окиси углерода CO термодинамически может начинаться уже при $400^\circ C$, то есть на $100^\circ C$ ниже, чем при реакции угля с CO_2 /рис. 14/. При реальных парциальных давлениях водяных паров /много меньших одной атмосферы/ степень конверсии воды в окись углерода еще выше /как и в случае реакции $C + CO_2$ /, поскольку $p(H_2O) = K_2(T)p^2(CO)$. Тем не менее, и эта реакция идет также значительно медленнее, чем реакции окисления.

Параллельно идет реакция окисления окиси углерода водой $CO + H_2O = CO_2 + H_2 + 9849 \text{ ккал/моль}$. С учетом этой реакции концентрация водорода H_2 существенно повышается /рис. 15/.

1.1.6. Газогенерация

Процессы окислительной газификации древесины ранее широко использовались в промышленности для получения горючих газов в металлургии, химии и даже на автомобильном транспорте.

Схема простейшего газогенератора /с "прямым процессом газификации"/ приведена на рис. 16. На решетку 4 цилиндрического аппарата 1 насыпают древесный уголь и поджигают его древесной растопкой /на решетке 4 или снизу из зольной камеры 3/ или факелом снаружи, или пламенем газовой горелки под решеткой. На хорошо разгоревшийся уголь через люк 10 загружают слой древесного угля 7, а затем закладывают до верха аппарата деревянные чурки длиной 40-70 мм, толщиной и шириной 30-60 мм по ГОСТ 2720-44 "Топливо древесное для газогенераторных автомашин и тракторов". Крышку аппарата 10 плотно закрывают и нагнетают в аппарат воздух 2 вентилятором /или впоследствии после выхода генератора на режим высасывают газы 5 потребителем - газогенераторным автодвигателем внутреннего сгорания/. В токе воздуха /"в дутье"/ развивается зона горения 6 толщиной 30-50 мм, где образуется смесь $CO + CO_2$. Температуры в этой зоне горения достигают $1300-1700^\circ C$. Выше в обуглившемся слое 7 происходит восстановление CO_2 до CO . В зоне восстановления реакции идут с поглощением тепла, поэтому температура в зоне восстановления понижается до $700-900^\circ C$. Выше зоны восстановления 7 располагаются зона сухой перегонки 8 и зона подсушки древесины 9, которые обогреваются теплом газов из обугленной зоны восстановления 7. Температура в зоне сухой перегонки составляет $450-150^\circ C$, в зоне подсушки $150-100^\circ C$ [8].

Наиболее ценный генераторный газ образуется в зоне восстановления. В этот газ подмешиваются влага и летучие продукты /включая смолы/ из верхних зон. В результате, из такого генераторного газа в газопроводах и всасывающей системе двигателя может выделяться смолистый водный конденсат, нарушающий работу двигательной установки. Поэтому такую схему газогенератора /с "прямой газификацией"/ используют только для газификации малосмолистых каменных углей.

А при газификации древесины для двигателей внутреннего сгорания используют газогенераторы с "обращенным процессом газификации" /рис. 17/. На решетку 1 насыпают слой древесного угля 7, на котором растопкой формируют зону горения 6, после чего аппарат заполняют доверху деревянными чурками. Крышку аппарата плотно закрывают, и через штуцеры 5 подают воздух /"дутье"/ вентилятором розжига. Сначала из газогенератора через штуцер 2 выходит "суховоздушный" генераторный газ $CO + CO_2 + N_2$, образующийся от горения древесного угля в зоне 6 и от восстановления в зоне 7. Затем по мере прогрева аппарата начинается сухая перегонка древесины в зоне 8 и подсушка древесины в зоне 9. Продукты сухой перегонки и водяной пар от подсушки древесины проходят под собственным избыточным давлением

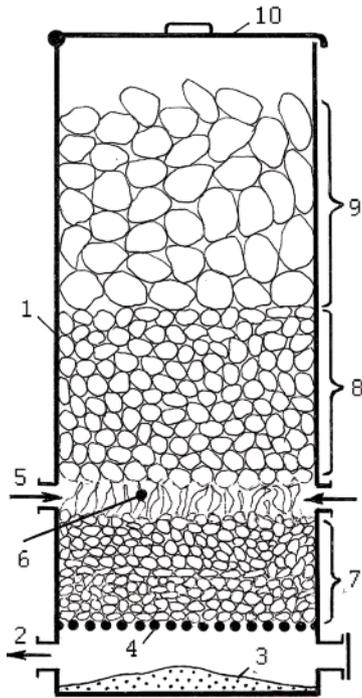


Рис.17. Схема газогенератора с обращенным процессом газификации [8]: 1 - корпус-бункер, 2 - вывод газогенераторного газа потребителю, 3 - зольник, 4 - решетка колосниковая, 5 - подача воздуха вентилятором/компрессором/розжига, 6 - зона горения, 7 - зона восстановления, 8 - зона сухой перегонки, 9 - зона подсушки, 10 - герметично закрывающаяся крышка.

через зону горения 6, где масла и смолы подвергаются вторичному термолузу /"крекингу" - разрушению на углерод и водород/, а водяной пар дополнительно газифицирует древесные угли по химической реакции типа $C+H_2O=CO+CO_2+H_2$.

Поскольку летучие продукты термолуза древесины и влага топлива в таком "обращенном" аппарате не могут выйти из газогенератора, минуя активную зону горения, поступающий потребителю генераторный газ 2, как правило, не содержит значительного количества смол и влаги. Такой генераторный газ из деревянных чурок влажностью 20% имеет следующий примерный состав /в % по объему/: водород 16,1%, двуокись углерода 9,2%, окись углерода 20,9%, метан 2,3%, непредельные углеводороды /без смол/ 0,2%, кислород 1,6%, азот 49,7%. При этом на 1 м^3 генераторного газа приходится влаги 97г, пыли 3,5г, смол 0,5г [8].

Отметим, однако, что состав генераторного газа чрезвычайно сильно /и порой неожиданно/ зависит от множества параметров /типа аппарата, вида топлива, режима дутья и температуры в активной зоне и т.д./ и может сильно колебаться во времени даже на одном и том же аппарате. Так, например, при увеличении скорости дутья, как правило, повышается теплотворная способность генераторного газа из-за увеличения выхода окиси углерода CO при повышении температуры в зоне горения /за счет известного в быту "раздувания огня потоком воздуха"/.

Для описания процесса газогенерации вместо понятия "скорости дутья" иногда вводится понятие "интенсивности газификации" или "напряженности горения" как скорости выгорания /газификации/ древе-

сины на единице площади поперечного сечения газогенератора. По сути, напряженность горения пропорциональна скорости подачи /расходу/ воздуха - интенсивности дутья. Чем больше напряженность горения - тем выше температура, тем больше выход CO, тем меньше концентрация азота в генераторном газе и тем выше его теплотворная способность /рис. 18/, но до известного предела /рис. 19/.

В качестве иллюстрации процессов, происходящих в активной зоне /в зонах горения и восстановления/ газогенераторов "прямой газификации" приведем распределение концентраций компонентов генераторного газа по высоте слоя на решетке /рис.20/. Вначале, непосредственно у решетки, наблюдается преимущественное содержание двуокиси углерода CO_2 , которая постепенно восстанавливается углем до окиси углерода CO. Процесс восстановления при температуре порядка 900°C практически прекращается. Свободный водород появляется лишь в верхних слоях активной зоны при уже пониженных температурах, что может свидетельствовать о низкой скорости реакции газификации угля парами воды.

1.1.7. Дровяная печь как газогенератор

Мы уделили столь большое внимание процессам в газогенераторах потому, что такие же процессы происходят и в обычных бытовых дровяных печах. Ведь пламена в печах - это по-существу горячие струи генераторных газов, истекающих из горящих дров /рис.21/.

Если в газогенераторе с прямым процессом газификации поджечь генераторные газы над деревянными чурками при открытой крышке

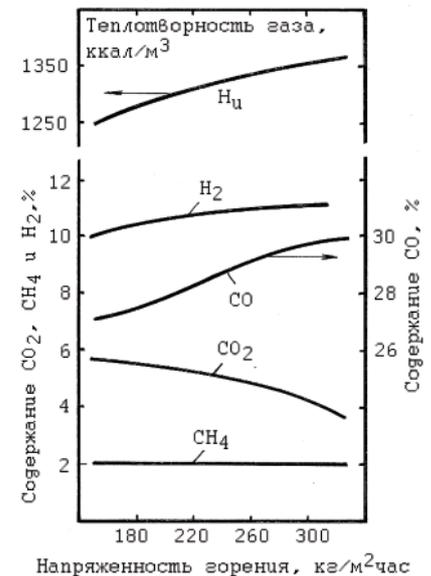


Рис.18. Изменение состава генераторного газа и его теплотворной способности в зависимости от интенсивности газификации антрацита с подачей водяного пара в количестве 40% от расхода топлива при работе газогенератора с прямым процессом газификации [8].

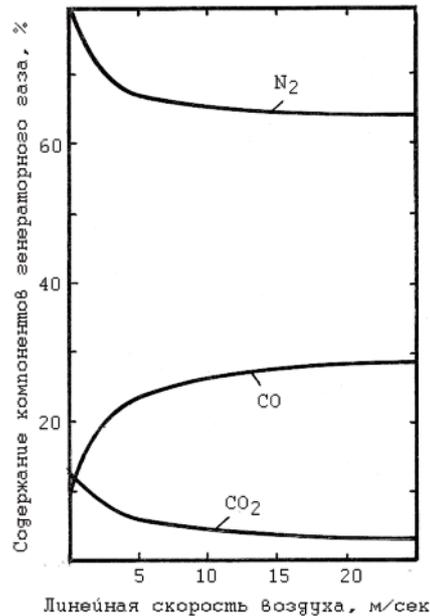


Рис.19. Изменение состава генераторного газа, получаемого при прямом процессе газификации древесного угля в газогенераторе с малой длиной активной зоны 225 мм в зависимости от скорости дутья [8].

10, то получим фактически топливник печи, работающий на принудительном дутье воздуха через зольник 3 и решетку 1 /рис.16/. При этом воздух, нагнетаемый в газогенератор под решетку, можно называть первичным /основным/, а воздух, подаваемый для сжигания генераторного газа над чурками, можно называть вторичным /дополнительным/.

Точно также, и в бытовой дровяной печи будем называть воздух под решетку первичным воз-

духом ПВ. А воздух, направляемый на сжигание газов над дровами, будем называть вторичным воздухом ВВ1 или ВВ2 /рис.21/.

Основное отличие печи от газогенератора заключается в том, что в бытовых печах в качестве нагнетателя воздуха используется не вентилятор с высоким напором 500-2000 Па /50 -200 мм вод.ст./, а дымовая труба с тягой всего 10-30 Па /1 -3 мм вод.ст./ . Расходы же воздуха примерно одинаковы 50-300 м³/час. Поэтому вместо высоких загрузочных слоев углей и древесных чурок, имеющих высокое газодинамическое сопротивление, используются тонкие слои 100 - 500 мм крупных по размеру дров /и углей/ с малым газодинамическим сопротивлением.

В этих условиях возникает значительный "проскок" первичного воздуха через слой горящих дров. Кислород воздуха просто не успевает полностью прореагировать внутри закладки горящих дров. При этом генераторный газ выходит из закладки дров в виде струй, горящих в остаточном кислороде воздуха /то есть в виде языков пламени над дровами/. В этих условиях вторичный воздух может оказаться излишним.

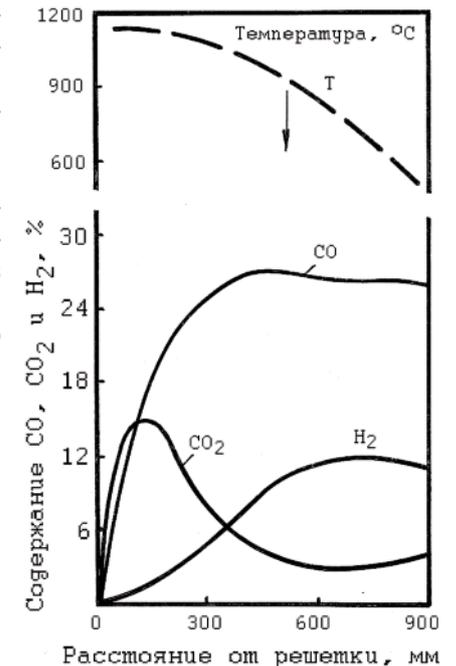
Аналогично, можно превратить в бытовую дровяную печь и газогенератор с обращенным процессом газификации /рис.17/. В частности это реализуется в бытовых металлических котлах /для нагрева оборот-

ной воды систем отопления зданий/ так называемого "пиролизного типа" /рис.22/. Сначала разжигают растопку на решетке 2 при открытой дверце 3 и при открытой задвижке прямого хода 5, затем загружают дрова 4, включают электровентиляторы 6, закрывают дверку бункера 3 и задвижку 5. Разгорающиеся /в токе первичного воздуха ПВ/ угли на решетке 2 нагревают дрова 4 и газифицируют их. Горючие газы проходят через слой раскаленных углей на решетке 2 и сгорают в нижней камере в виде пламени 8 в токе вторичного воздуха ВВ.

Для этой схемы тяги трубы обычно не хватает, поэтому приходится использовать вентиляторы для нагнетания воздуха в бункер и нижнюю камеру сгорания. Поэтому эта схема для обычных "дачно-деревенских" печей "без электричества" подходит мало, хотя и может быть доработана в определенных условиях.

В дровяных печах /также как и в газогенераторах/ большую роль может играть проход летучих продуктов термоллиза древесины через пламя или слой раскаленных углей /то есть метод вторичного термоллиза -"крегинга" продуктов первичной газификации/. Действительно, при горении дров в топке печи продукты термической газификации древесины фильтруются из глубины поленьев наружу через слой раскаленного угля и разлагаются сначала в восстановительной среде углерода, а затем дополнительно разрушаются в окислительной среде пламени при выходе из обугленного слоя древесины. Тем самым, в частности, существенно снижается дымление при горении дров /см. далее в разделе 1.3.6/.

Рис.20. Состав газа и температура в активной зоне /в зонах горения и восстановления/ стационарного газогенератора с прямым процессом газификации на влажном антраците [8]. Вертикальная стрелка указывает примерный момент прекращения восстановления двуокиси углерода CO₂ углеродом углей.



1.2. Воспламенение древесины

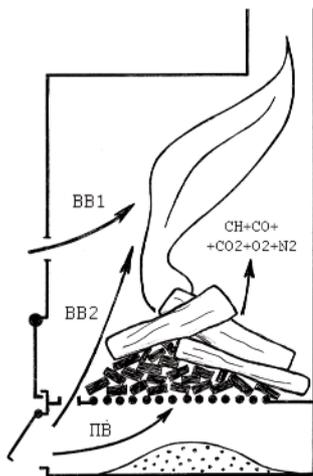
Для древесины, также как и для керосина, справедлив принцип “сначала нагреть - потом поджечь”. Действительно, прежде, чем воспламениться, полено в печи должно разогреться за счет “растопки” - первичной закладки лучины и/или за счет углей и пламени предыдущей закладки дров и/или за счет теплового излучения стенок топки.

На практике нагрев поленьев в топке происходит как бы автоматически без участия печника. Поэтому печники редко интересуются механизмами воспламенения древесины при розжиге дров. Не загорелось от растопки - значит надо вновь заложить еще одну растопку, теперь уже с большим количеством лучины. Только и всего.

Тем не менее обсуждение вопросов воспламенения чрезвычайно важно, поскольку само горение дров является по-существу процессом воспламенения все новых и новых зон поленьев или других поленьев.

1.2.1. Температурный фактор

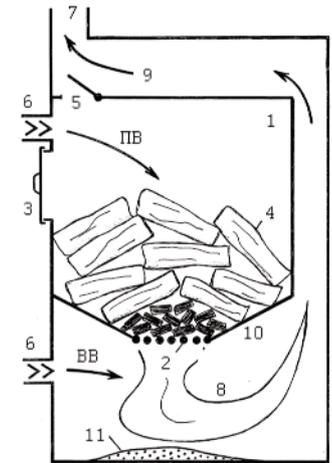
Для первичной оценки необходимых условий для воспламенения древесины, возьмем образец древесины 4 и станем нагревать его лучистым теплом 3 от мощной радиационной панели - лампы накаливания 1 с рефлектором 2 /рис. 23/. Непосредственно около древесины /но не нагревая ее/ установим постоянно горящую газовую горелку 6.



Отодвигая или приближая радиационную панель от образца древесины, найдем тепловой поток, при котором от газовой горелки начинают воспламеняться летучие продукты термолиза древесины 5. В соответствии с такими замерами по ГОСТ 30402-96 “Материалы строительные. Метод испытаний на воспламеняемость” / ISO 5657/, воспламенение летучих происходит при удель-

Рис.21. Пламя в печи как горение струй горячих газов - летучих продуктов прямого процесса газификации древесины. ПВ - первичный воздух, поступающий через колосниковую решетку для горения углей. ВВ1 и ВВ2 - вторичный воздух, подаваемый разными способами для горения горячих газов, выделяющихся из древесины, нагреваемой углями.

Рис.22. Пламя под решеткой пиролизной топки как горение струй горячих газов - летучих продуктов обратного процесса газификации древесины. ПВ - первичный воздух для горения и газификации древесины. ВВ - вторичный воздух для горения горячих газов. 1 - бункер для загрузки дров, 2 - решетка колосниковая, 3 - плотно закрывающаяся дверка, 4 - дрова, 5 - задвижка “прямого хода” для первичного розжига дров, 6 - электровентиляторы подачи воздуха, 7 - дымовая труба с тягой, 8 - струя горящих продуктов газификации в виде голубого пламени, сгорающая во вторичном воздухе /при нехватке проска первичного воздуха/, 9 - дымовые газы, 10 - металлическое дно бункера, нагреваемое пламенем, 11 - зола.



ном тепловом потоке на древесину порядка 14 кВт/м^2 . Такой тепловой поток соответствует мощности излучения абсолютно черного тела при температуре 440°C . Конечно, полученные таким образом цифры весьма условны и могут сильно отличаться для разных образцов древесины. Тем не менее ясно, что если углей в печи много и они раскалены /до 1000°C и выше/, то воспламенение сухой древесины неизбежно. И если стенки топки раскалены до температур порядка 500°C и выше, то можно также ожидать “автоматического” воспламенения дров /см.раздел 5.8.4/.

При таком обследовании остается неизвестной роль температуры поверхности древесины в момент воспламенения. Для выяснения вопроса будем последовательно помещать образец древесины в термостат /или муфельную печь/ с заданной температурой. Разогрев поверхности древесины при этом будет происходить как лучистым теплом от стенок термостата, так и конвективным теплом от горячего воздуха. Температуру поверхности образца древесины будем измерять термопарой. При сравнительно невысоких температурах образец древесины, постепенно нагреваясь, достигает температуры термостата T_1 , а при выключении термостата охлаждается в соответствии с кривой 1 /рис.24/. При достижении некоторой температуры T_2 образец древесины уже начнет саморазогреваться за счет экзотермического разрушения целлюлозы и, возможно, за счет окисления. При этом температура образца превысит температуру термостата T_2 . И наконец, при некоторой температуре T_3 происходит внезапный спонтанный самогрев древесины до температур, значительно превышающих температуру термостата, с возникновением визуально видимого горения [10].

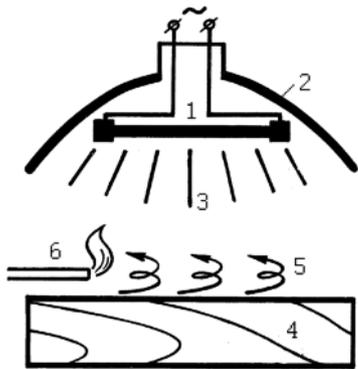


Рис.23. Принципиальная схема установки для испытаний строительных материалов на воспламеняемость по ГОСТ 30402-96: 1 - излучательный элемент радиационной панели, 2 - отражатель зеркальный, 3 - лучистый поток тепла, 4 - образец древесины, 5 - летучие продукты термализации, 6 - подвижная газовая горелка, выполняющая роль системы зажигания /поджига/.

Возникшее горение может проявиться либо тлением, либо пламенем. Случай самопроизвольного появления тления называется самовозгоранием. А случай самопроиз-

вольного 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 /не успевающих “разлететься” в стороны/, поэтому доминируют процессы самовоспламенения. Разброс температур самовозгораний-самовоспламенений древесины /фактически от T_2 до T_3 / может оказаться значительным: от обычных температур самовоспламенения на уровне 400°C до случаев возгорания древесных опилок непосредственно у труб водяного отопления даже при 80°C . В случае же газов температуры T_2 и T_3 практически совпадают. Это объясняется значительной теплоемкостью древесины и разными способностями аккумуляции тепла саморазогрева опилок и газов, в том числе, тепла от биологического гниения и тепла от химических окислений, например, окислений промасленной ветоши, в которой постепенно накапливаются самовоспламеняющиеся перекисные соединения.

Если бы мы в термостате оборудовали постоянно действующий источник зажигания летучих над древесиной /пламенную горелку или электрическую искру/, то мы бы имели случай принудительного воспламенения, и появление горения наблюдалось бы при значительно более низких температурах, при которых у поверхности древесины создавалась бы концентрация горючих газов выше НКРП. Таким образом первичная вспышка древеси-

ны от источника зажигания всегда происходит в предварительно перемешанной горючей газовой смеси, то есть в кинетическом режиме с голубым пламенем /см. далее раздел 1.3.1 и рис.57/.

Источник зажигания при этом, естественно, должен иметь температуру, превышающую температуру самовоспламенения летучих, но при этом не должен разогревать древесину. То есть речь шла бы о самостоятельном процессе в плане выделения и накопления летучих в воздухе, но не о самостоятельном в плане запуска цепных реакций саморазогрева-самовоспламенения. При этом может наблюдаться кратковременная вспышка накопившихся летучих от внешнего источника зажигания, переходящая либо в устойчивое тление /возгорание/, либо в устойчивое пламенное горение /воспламенение/.

Температуры воспламенения древесины обычно составляют $250-300^{\circ}\text{C}$, температуры самовозгорания тлением $260-320^{\circ}\text{C}$, температуры самовоспламенения $360-500^{\circ}\text{C}$ [1]:

Тип древесины	Сосна	Ель	Дуб	Груша	Бук
Температура воспламенения, $^{\circ}\text{C}$	250	240	230	300	300
Температура самовоспламенения, $^{\circ}\text{C}$	390	380	370	500	490

1.2.2. Размерный фактор

Выше мы определили уровень температур воспламенения. Но до указанных температур мелкие образцы древесины /как менее теплоемкие/ нагреваются быстрее, чем крупные, и вспыхивают первыми. Иногда даже говорят, что мелкие образцы древесины имеют меньший период индукции воспламенения /возгорания/, чем крупные.

Поэтому может возникнуть ощущение, что для воспламенения важен скорее размер поленьев, чем температура. Ведь лучина вспыхивает “сразу”, а крупное полено много позднее. Все это является следствием значительных величин объемной теплоемкости $1000-1400 \text{ кДж/м}^3\cdot\text{град}$ и теплопроводности $0,1-0,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ сухой древесины, сравнимых с величинами объемной теплоемкости $1760 \text{ кДж/м}^3\cdot\text{град}$ и теплопроводности $0,15 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ керосина. В случае же горючих газов /или горючих паров жидкостей/ сложностей в зажигании больших объемов газа не выявляется, ввиду очень низкой объемной удельной теплоемкости газов $1,2-1,6 \text{ кДж/м}^3\cdot\text{град}$ и низкой теплопроводности $0,02-0,03 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ по сравнению с твердыми и жидкими веществами.

Как и в случае керосина, легче возбудить горение малого количества древесины. Поэтому используют мелко колотую /лучину/ или сильно ворсистую древесину. Так, бросая на угли костра 2 деревянную дощечку 1 и периодически переворачивая ее для осмотра, мы видим, что сначала обугливаются и начинают тлеть именно заусенцы 3 /ворсинки/

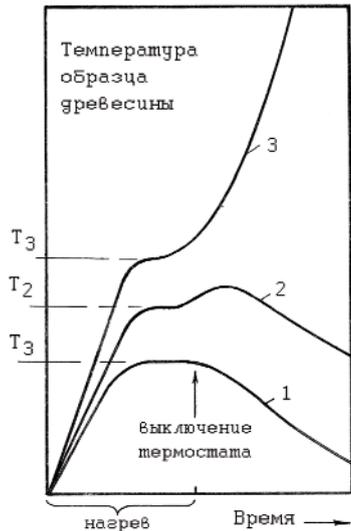


Рис.24. Разогрев образца древесины в термостате, нагретом до разных температур T_1 , T_2 и T_3 : 1 - до наступления саморазогрева, 2 - при наличии саморазогрева, 3 - при воспламенении из-за саморазогрева.

на поверхности дощечки /рис.25/. Значит, для снижения пожароопасности следует удалять ворсистость деревянных досок /строганием, шлифованием, обжигом/. А для облегчения загорания дров на поленьях полезно делать топором засечки /насечки, заусенцы, заструги/.

Продолжая нагревать дощечку на раскаленных углях, мы замечаем, что поверхность нижней горячей стороны дощечки начинает постепенно

буреть, а затем и чернеть /обугливаться/. Однако, при перевертывании дощечки ни тления, ни устойчивого пламени на горячей стороне пока нет. Лишь местами можно увидеть ленивые голубые прозрачные всполохи. Это указывает на то, что из древесины начинают выделяться горючие газы, видимо, вначале простейшие /спирты, альдегиды, кетоны/ в незначительном количестве.

При дальнейшем прогреве дощечки обуглившийся слой на нижней части дощечки начинает тлеть /см. далее раздел 1.4/. При этом из торцов дощечки появляются белые /бурые/ дымления. Это струи конденсирующихся /в форме тумана/ паров продуктов термоллиза древесины, выходящих под собственным напором из пор нагревающейся древесины /см. раздел 1.3.5/. Наконец, на границе с кромкой дощечки /где есть кислород воздуха/ белые дымления воспламеняются, возникает светложелтое пламя 9, впоследствии охватывающее всю нижнюю сторону. Это означает, что дощечка воспламенилась, и если ее извлечь из очага, она может гореть на воздухе самостоятельно.

1.2.3. Треск воспламенившейся древесины

Момент возникновения собственного пламени 9 с ускоренным утолщением обугленного слоя 4 /рис. 25/ безошибочно угадывается истопником по появлению характерного треска горячей древесины.

Всем известно, что поленья при горении шипят, трещат, щелкают и "стреляют". Треск горячей древесины обусловлен растрескиванием образующихся древесных углей. Обугливающиеся волокна целлюлозы сокращаются в длину, что легко увидеть по выгибанию спички 1 /лучины/ на электроплитке 2 при появлении обугливания /рис.26-а/. Сначала при температурах до $200-250^{\circ}\text{C}$ спичка просто бурет-чернеет. Затем ускоренно образующийся при $250-400^{\circ}\text{C}$ уголь преимущественно с нижней стороны сжимается и заставляет спичку изгибаться дугой. Потом при $400-450^{\circ}\text{C}$ на нижней стороне начинают появляться трещинки поперек волокон, спичка перестает изгибаться и может обломиться.

А вот дощечка не сгибается и не обламывается /рис.26-б/. И на ней отчетливо видны образующиеся продольные и поперечные 5 трещины в сжимающемся угольном слое 4, рвущемся из-за невозможности сократиться в линейных размерах на подложке несгоревшей древесины 3. Многочисленные разрывы обугливающих волокон целлюлозы слышны как постоянный треск, а эпизодические отскакивания пластинок-чешуек 7 воспринимаются как щелкания. Быстро усыхающая от пламенного нагрева древесина начинает коробиться и растрескиваться [18]. При этом, естественно, обламываются и отскакивают крупные фрагменты угольного слоя. Под действием высокого давления пиролизных газов внутри древесины, эти фрагменты мощно "отстреливаются" на большие расстояния с громкими щелчками - "выстрелами" и образованием всполохов пламени.

Древесина разных пород по-разному трещит и щелкает при воспламенении. Очень сильно трещит пихта. Осина часто потрескивает /"мелко" трещит, искрит/, поэтому при изготовлении спичек ее пропитывают солями. Сосна издает треск редко, но зато мощно /"стреляет"/. Береза трещит слабо. А бук вообще не трещит. Ясно, что крупные поленья "стреляют" чаще и сильнее, чем мелкая лучина.

Газетная бумага, состоящая из склеенных коротких волокон-фибрил целлюлозы, потрескивает /"шуршит"/ только при тлении, когда происходят разламывания угольного остатка. При пламенном горении практически не шуршит. Мелованная бумага горит и тлеет беззвучно.

1.2.4. Распространение зоны воспламенения

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.

Как уже отмечалось выше, спецификой древесины является высокая объемная теплоемкость /по сравнению с объемной теплоемкостью газов/. Выделение тепла в ходе горения пропорционально площади горячей древесины, а тепло, потребное для разогрева новых частей полена, пропорционально объему древесины.

Поскольку поверхность полена поперечного размера R растет пропорционально R , а объем древесины растет быстрее /как квадрат R^2 или даже куб R^3 /, то с укрупнением поленьев возникают энергетические затруднения с пламенным воспламенением новых зон древесины. Случается, что даже вертикальный толстый столб, подоженный пожаром в степи снизу, не может догореть пламенем доверху и повисает на проводах /рис. 27-б/. А мелкие же одиночные поленья /лучины/ горят пламенем самостоятельно и быстро, сгорая пламенем до конца даже в горизонтальном положении /рис. 27-а/. А очень мелкие “полешки дров” в виде древесных опилок /пыли/ вспыхивают даже в виде газовзвеси в воздухе /взрывы в лесопильных цехах/. Так что при растопках сначала зажигают спичку, затем бумагу и лучину, а потом уже более крупные поленья. Причем крупные поленья будут гореть пламенем лишь в условиях компенсации тепловых потерь - в раскаленной топке или в виде кучи поленьев /костра/, когда одно горящее полено греет другое /см. далее раздел 1.3/.

В соответствии с вышеизложенным применительно к пламенному горению можно ввести понятия “термически толстого” и “термически тонкого” образца древесины [10,19]. Термически толстое холодное одиночное полено горит в горизонтальном положении медленно на грани перехода к тлению условно с линейной скоростью 0,005 м/мин. А при уменьшении поперечного размера полена /условно до толщины евровагонки 10 мм/ скорость распространения пламени по горизонтально ориентированному полону резко возрастает и достигает в случае спички величин порядка 0,12 м/мин /рис. 28/.

Линейная скорость распространения пламени резко возрастает при увеличении исходной температуры полена, условно выше 230°C. Так, скорость распространения огня по круглому лесу /по бревнам/ в штабелях на открытом складе в условиях пожара составляет обычно менее 0,7 м/мин, а по пиломатериалам /по доскам/ в штабелях достигает 4 м/мин /www.structureprom.info/.

Линейная скорость распространения пламени по поверхности древесины резко растет также с ростом концентрации кислорода в воздухе и увеличением угла наклона первоначально горизонтального образца древесины горячей поверхностью вверх /рис.28/. Повышение

влажности древесины снижает скорость распространения пламени по бревнам на складе с 4 м/мин при влажности древесины 8-12% до 1,2 м/мин при влажности древесины 20-30%.

Одновременно с распространением пламени по поверхности древесины начинается процесс выгорания древесины вглубь. В теории пожаротушения вводится понятие скорости массового выгорания древесины вглубь, характеризующее стойкость деревянных балок перекрытий. Эта величина скорости выгорания весьма условна. Так, в условиях пожара при перевозке древесины транспортом “стандартная” скорость выгорания древесины принимается равной 0,014 кг/м².сек [20]. А в условиях пожара на складе средняя скорость выгорания древесины влажностью 13,7% принимается равной 0,039 кг/м².сек /по ГОСТ 12.1.004-91/. При этом средняя “по полону” /за все время горения в пересчете на нормальные условия 20°C и 1 атм/ линейная скорость горючих газов /летучих продуктов термоллиза/, истекающих с поверхности горячей древесины, может достигать величин порядка 4 см/сек и более.

В момент воспламенения температура поверхностного слоя обугленной поверхности древесины быстро возрастает до 450-500°C, а затем постепенно повышается до 600-700°C. Пламенное горение древесины практически полностью прекращается при снижении массовой скорости выделения летучих до уровня 0,005 кг/м².сек при толщине углей на древесине порядка 20 мм [19]. При такой толщине угольного слоя летучие выходят уже только через трещины [21]. А при толщине угольного слоя более 100 мм фактически прекращается и сам пиролиз в глубине горящего полена.

Прекращение пламенного горения открывает доступ кислорода воздуха непосредственно к угольному слою на древесине,

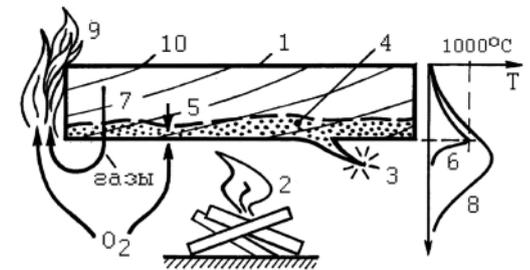


Рис.25. Воспламенение деревянной дощечки над горящими дровами в печи: 1 - деревянная дощечка /вид с торца/, 2 - горящие дрова, 3 - заусеница, воспламеняющаяся в первую очередь, 4 - газопроницаемый обугливающийся слой, 5 - газообразные горючие продукты термоллиза /“летучие”, сгорающие в тлеющем обугливающемся слое, 6 - распределение температуры при тлеющем горении, 7 - летучие, сгорающие вне древесины в виде пламени, 8 - распределение температуры при пламенном горении, 9 - язык пламени, охватывающий нижнюю сторону доски и вырывающийся вверх за кромкой дощечки, 10 - годовые слои древесины /иллюстративно/.

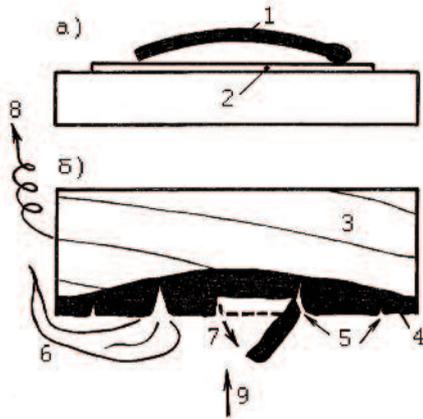


Рис.26. Обугливание древесины: а - выгибание обугливающейся спички /с предварительно обожженной головкой/, б - обугливание доски. 1 - спичка, 2 - электроплитка, 3 - дощечка с волокнами древесины, направленными параллельно листу бумаги, 4 - обугленный слой на дощечке, 5 - трещины обугленного слоя, вызванные укорочением и разрывом обугливающегося волокон /трехеид/, 6 - пламя из трещин, 7 - отскок угольных пластинок, 8 - выход невоспламенившихся конденсирующихся продуктов термоллиза в виде тумана /белого или бурого дыма/, 9 - направление воздействия пламенного потока.

который разогревается за счет собственного горения до 800-1200°C /см. далее раздел 1.4/. Однако из-за того, что угольный слой горит медленно и имеет теплопроводность в 4 раза ниже, чем у самой древесины, скорость потери рабочего сечения горящих деревянных конструкций составляет в среднем 1 мм в минуту [10]. Поэтому деревянные конструкции порой противостоят обрушению при пожаре в течение более продолжительного времени, чем стальные, которые могут не выдержать нагрузок из-за снижения механической прочности /в том числе и из-за появления пластичности, то есть “ковкости” металла/ при нагревании.

Отметим, что горение “потолочных” /имеющих пламя снизу/ поверхностей древесины затруднено ввиду газодинамически ограниченного притока кислорода к горячей поверхности древесины.

Все изложенное в этом разделе относится к пламенному горению поверхности древесины. Горение же древесины в форме тления слабо зависит от размерных характеристик поленьев /см. раздел 1.4/.

1.3. Пламенное горение древесины

Под пламенным горением будем понимать видимые глазом /светящиеся/ формы горения горючих газов - летучих продуктов термоллиза древесины. Пламенное горение наблюдается как в форме “язычков” пламени /факелов/, так и в форме эпизодически появляющихся всполохов пламени /фронт огня/, распространяющихся по объему топки.

Языки пламени представляют собой потоки /струи/ горючих газов, сгорающие в окружающем их воздухе. Горючее и окислитель разделены

так же, как в пламенах парафиновых свечей и керосиновых ламп /гетерогенное горение предварительно не перемешанных газов/.

Всполохи пламени представляют собой перемещающиеся зоны горения в готовых смесях горючих газов с воздухом /гомогенное горение предварительно перемешанных газов/. Дело в том, что при горении древесины часть летучих продуктов термоллиза исходит из прогретых, но пока еще не горящих зон поверхности поленьев /в частности, из негорящих торцов поленьев/. При этом сначала образуются смеси горючих газов с воздухом в виде областей воздуха, загазованного летучими продуктами термоллиза. При возникновении концентраций горючих газов выше нижнего концентрационного предела распространения пламени /НКПРП/ эти загазованные области воздуха могут воспламениться.

Таким образом, в топках могут наблюдаться пламена предварительно не перемешанных и предварительно перемешанных газов. Эти предельные формы горения сильно отличаются физикой явлений.

1.3.1. Горение перемешанных газов

Рассмотрим процесс распространения пламени /фронта воспламенения Ф/ с некой “скоростью горения” V по предварительно приготовленной гомогенной /однородной/ горючей смеси, состоящей из горючего газа А /в общем случае, многокомпонентного/ и окисляющего газа В /например, воздуха/ при исходной температуре T_0 /рис. 29 слева/. За счет наличия зоны раскаленных продуктов горения /рис.29 справа/ исходная горючая смесь нагревается кондуктивным, конвективным и лучистым теплом. При достижении температуры воспламенения T_B начинаются реакции окисления $A + B = AB + Q$. Выделяющаяся тепловая энергия химической реакции Q еще больше нагревает смесь и еще больше ускоряет протекание реакций окисления. В результате горючая

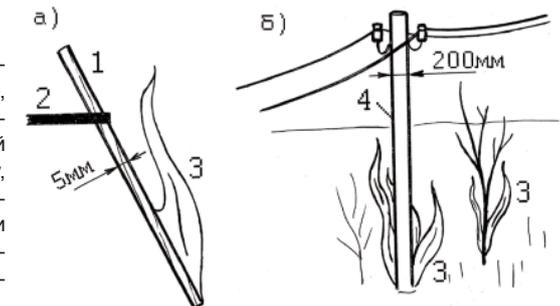


Рис.27. Особенности пламенного горения: а - тонкая лучина, подожженная снизу, сгорает пламенем до верха, б - толстый столб, подожженный снизу, может истлеть, но сгореть пламенем до верха не сможет и повиснет на проводах. 1 - лучина, 2 - держатель, 3 - пламя, 4 - столб деревянный.

смесь воспламеняется и в ходе горения образует смесь продуктов горения с некой температурой, которая при отсутствии потерь на излучение была бы строго равна термодинамически расчетной температуре T_p .

Исходная горючая смесь газов характеризуется количественным соотношением компонентов, чаще всего наглядной безразмерной расчетной величиной, называемой “коэффициентом избытка окислителя” и обозначаемой обычно буквой “альфа”: $\alpha = \xi / \xi_0$, где $\xi = N_{O_2} / N_{гор}$, N_{O_2} и $N_{гор}$ - объемные, массовые или счетные содержания /количества, расходы или концентрации/ окислителя и горючего соответственно, ξ_0 - стехиометрический коэффициент /то есть ξ для стехиометрической смеси по формуле химической реакции/.

Понятие термодинамически расчетной температуры T_p может быть расширено [11]. “Теоретическая” температура горения T_T - это температура термодинамически равновесного состава продуктов сгорания T_p , но рассчитанная не для условной /например, 0°C /, а для реальной исходной температуры воздуха и топлива T_0 , с учетом реального коэффициента избытка воздуха и с учетом диссоциации трехатомных молекул H_2O и CO_2 .

“Калориметрическая” температура горения T_K - это температура T_p , но без учета диссоциации трехатомных молекул. Калориметрическая температура применяется в основном для исходно малокалорийных, но горячих газов /типа доменных или генераторных/.

“Жаропроизводительность” $T_{ж}$ - это калориметрическая температура T_K , но при $T_0 = 0^\circ\text{C}$ и при коэффициенте избытка воздуха, равном единице, то есть при стехиометрической горючей смеси.

Все перечисленные расчетные температуры горения являются адиабатическими, то есть не учитывают потери тепла, в частности, на тепловое ИК-излучение. Эти расчетные

температуры горения близки друг к другу. Так, для стехиометрических смесей природного газа с воздухом $T_T = 1950^\circ\text{C}$, $T_K = 2050^\circ\text{C}$, $T_{ж} = 2040^\circ\text{C}$. Поэтому при чисто теоретических анализах в дальнейшем будем для простоты называть все эти температуры (помня о такой условности и не взирая на возмож-

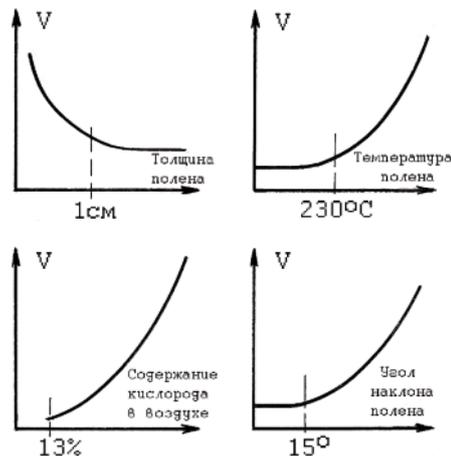


Рис. 28. Изменение линейной скорости распространения пламени по поверхности древесины в зависимости от толщины /поперечного размера/ полена, от исходной температуры полена /в глубине древесины/, от концентрации кислорода в воздухе, от угла наклона полена.

ный разброс численных значений) одним термином - “термодинамически расчетной” температурой горения T_p при указанном избытке воздуха, имея в виду, что все эти значения расчетных температур получаются формальным термодинамическим расчетом, но по разным формулам. Понятия термодинамически расчетных температур удобны тем, что они есть в любом теплотехническом справочнике. Реальные же экспериментально измеряемые температуры горения T_3 на практике намного ниже термодинамически расчетной температуры горения T_p из-за наличия теплотерь на излучение.

“Действительная” расчетная температура горения T_d рассчитывается /при необходимости численно в каждом конкретном случае/ с учетом тепловых потерь /в том числе, и на излучение/ и с учетом наличия избытка воздуха. Такая неадиабатическая /термодинамически неравновесная/ расчетная температура T_d оказывается на $400-500^\circ\text{C}$ ниже термодинамически равновесной T_p при заданном избытке воздуха и приближается к реальным экспериментально измеряемым температурам продуктов сгорания T_3 .

Все указанные температуры горения являются фактически температурами продуктов сгорания. В случае горения предварительно перемешанных газов это справедливо. Но в случае предварительно не перемешанных газов экспериментально измеренная температура горения T_f в оболочках пламен значительно превышает температуру продуктов сгорания T_3 /см. далее рис.87/.

Согласно молекулярно-кинетической теории каждый газ /пар/ представляет собой дискретную среду - смесь различных и многочисленных частиц /молекул и атомов/, хаотически движущихся и постоянно сталкивающихся между собой /“толкающихся в толпе”/. Так, например, при комнатной температуре и атмосферном давлении 1 м^3 воздуха состоит из $2,7 \cdot 10^{25}$ частиц размером $3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, из них 79% молекул азота N_2 и 21% молекул кислорода O_2 . Средняя длина свободного пробега между соударениями молекул составляет $9 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, частота соударений молекул равна $5 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$. В результате этих многочисленных соударений молекулы в газе получают статистический спектр собственных кинетических энергий /линейных скоростей v / в соответствии с распределением Максвелла $n(v) = 4\pi v^2 (m/2\pi kT)^{3/2} \exp(-mv^2/2kT)$, а также статистический спектр собственных потенциальных энергий, в частности, в поле земного тяготения в виде распределения концентраций $n(h)$ молекул по высоте h над уровнем моря в соответствии с законом Больцмана $n(h) = n_0 \exp(-mgh/kT)$, где m - масса молекулы, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$ - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура в $^\circ\text{K}$ /рис.30/.

В указанных формулах понятие температуры T носит чисто статистический смысл как средняя кинетическая или потенциальная энергия ансамбля частиц. При этом абсолютно безразлична химическая природа частиц /азота, кислорода, аргона и др./, существенна лишь

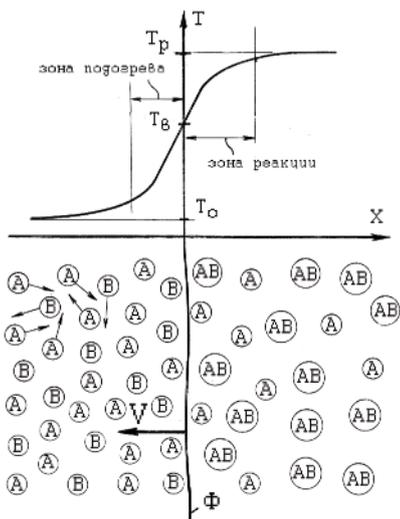


Рис.29. Распространение фронта пламени Φ со скоростью V по предварительно перемешанной /гомогенной/ горючей смеси из молекул горючего A и молекул окислителя B с получением продуктов реакции AB . Приведен случай избытка горючего A , когда концентрация горючего в исходной смеси больше стехиометрического /теоретически необходимого для полного преобразования горючего и окислителя/ уровня, задаваемого химической формулой реакции.

масса молекул. Более легкие частицы в смеси имеют более высокие скорости и за счет этого обладают теми же кинетическими и потенциальными энергиями, что и другие более тяжелые частицы в смеси.

В молекулярно-кинетической теории вещества каждая частица-молекула может иметь только вполне определенный вид, определяющий ее химическую суть. Так, например, молекула водорода H_2 не может "лететь и гореть" в кислороде O_2 . Она может лишь "разом" дискретно преобразоваться при соударении с молекулой кислорода в молекулу воды H_2O либо в радикал /короткоживущую молекулу/ гидроксида OH , причем вновь образовавшаяся молекула может оказаться в возбужденном /тоже во вполне определенном дискретном квантовом/ состоянии.

Согласно распределению Максвелла, в газе всегда имеются очень энергичные /быстрые/ молекулы, которые и определяют ход протекания химических реакций, поскольку медленные молекулы не могут преодолеть потенциальный энергетический барьер химической реакции /обусловленный отталкиванием одноименно заряженных электронных оболочек молекул/ и упруго отскакивают друг от друга. Но при больших скоростях частица B может преодолеть энергетический барьер отталкивания $E_{\text{порог}}$. В результате неупругого соударения молекулы A и B превращаются на миг в возбужденный комплекс AB^* с общей электронной оболочкой /рис.31/. Этот комплекс AB^* может тотчас вновь разделиться на исходные составляющие /как бы "скатиться" назад с энергетической "горки" $E_{\text{порог}}$ /, если только за время существования возбужденного комплекса не произойдет отбор его потенциальной энергии с "падением" комплекса на "дно энергетической ямы" с получением устой-

чивой молекулы AB . Потенциальную энергию комплекса способны отобрать "третьи" молекулы /сталкивающиеся с частотой $5 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$ с возбужденным комплексом/, а также кванты излучения /фотоны/.

Так, молекула A , набегая на возбужденный комплекс AB^* /представляющий собой сильно колеблющуюся и вращающуюся "пружинку" - возбужденную молекулу AB / отскакивает как бильярдный шар с ускорением /то есть с увеличением скорости с V_1 до V_2 /, отбирая тем самым энергию у комплекса AB^* /рис.32/. Такие тройные соударения, отбирающие энергию и опережающие "высвечивание" кванта излучения, называются "тушущими". Дезактивация комплекса AB^* может происходить многоступенчато с промежуточным образованием возбужденных молекул AB /рис.31/. В результате получается газовая смесь продуктов сгорания с большими скоростями движения молекул /то есть горячая/. Ясно, что при наличии лучистых потерь /то есть при высвечивании квантов излучения/, температура продуктов сгорания будет более низкой.

Процесс горения предварительно перемешанных газов может реализовываться в самых разных формах и в самых разных условиях. Может, например, воспламениться практически одновременно вся горючая смесь разом в некоем заданном объеме. В таком случае по оси X подразумевается временная координата /рис.29/. Если при этом объем реагирующей газовой смеси строго фиксирован оболочкой, то такая система называется "бомбой" /изохорический процесс, то есть процесс при постоянном объеме, но с повышающимся давлением/.

Но чаще встречается рассмотренный выше процесс горения в виде фронтов пламени /рис.29/. Поскольку объем горячих продуктов сгорания превышает объем исходной холодной горючей смеси, то за фронтом пламени возникает ускоренный поток продуктов сгорания. Если поток продуктов сгорания

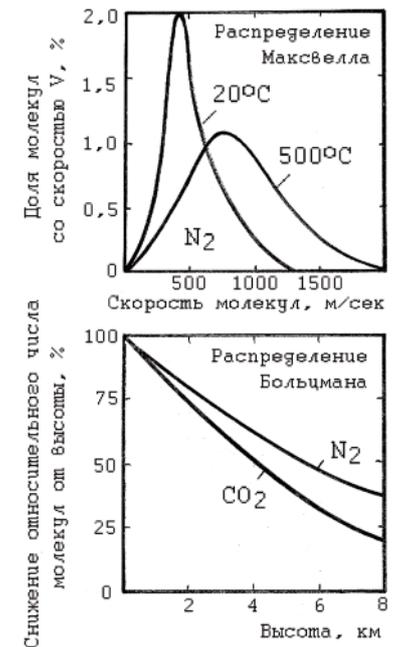


Рис.30. Равновесные распределения молекул газа по кинетической энергии /по скоростям молекул/ и по потенциальной энергии /по высоте над уровнем моря/.



Рис.31. Кривая потенциальной энергии взаимодействия двух реагирующих молекул А и В. Характерными элементами являются $E_{\text{порог}}$ - пороговая энергия неупругого взаимодействия и Q - теплота реакции. Здесь E_i - квантованные энергетические уровни возбуждения молекулы АВ.

“затормозить”, например, стенкой, то между фронтом пламени и стенкой возникнет область повышенного давления /эффект “взрывной силы газов” - фугасный эффект/. Это давление может ускорить распространение фронта горения - такое явление быстрого распространения пламени называется взрывом газовоздушной смеси.

Если скорость фронта пламени приближается к скорости звука и давление взрыва за фронтом пламени повышается значительно, то может возникнуть ударная волна. При этом разогрев исходной газовой смеси будет происходить не только за счет лучистого тепла и теплопроводности, но и за счет адиабатического сжатия газов ударной волной. Такой процесс “сверхбыстрого” распространения пламени называется детонацией.

А если пламя распространяется в неограниченном пространстве и повышенное давление за фронтом пламени успевает выравниваться /“рассасываться”/ за счет свободного расширения газов, то процесс является изобарическим. Такое выравнивание давления с ускорением потока продуктов сгорания происходит, в частности, в горелке Бунзена, где фронт пламени распространяется со скоростью V в движущейся исходной газовой смеси, в результате чего сам фронт пламени неподвижен /“стабилизирован”/ относительно трубки горелки /рис.33/. При больших скоростях истечения газов пламя может турбулизироваться или отрываться от горелки. А при малых скоростях пламя может проскакивать в трубку и стабилизироваться /или не стабилизироваться/ там.

Рис.32. Схема образования молекулы АВ через возбужденный /“колеблющийся и вращающийся”/ комплекс - возбужденную молекулу АВ*. Возбужденная молекула может терять свою внутреннюю энергию возбуждения как за счет “тушащих” соударений с третьими частицами /например, молекулами А, как на рисунке/ или за счет “высвечивания” кванта излучения.

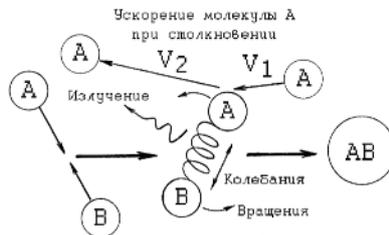
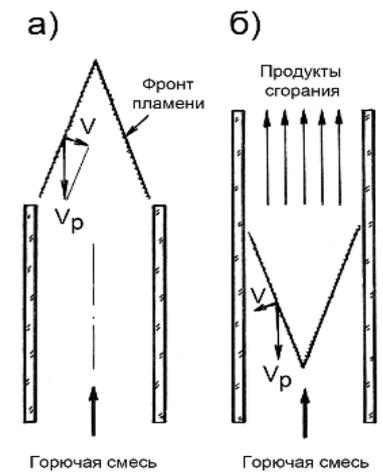


Рис.33. Неподвижные /“стабилизированные”/ фронты пламени в потоке перемешанной смеси горючего и окисляющего газов: а - в горелке Бунзена, б - в трубе Коварда-Джонса. Здесь V - нормальная скорость распространения пламени перпендикулярно фронту /рис.36/, V_p - скорость по потоку.



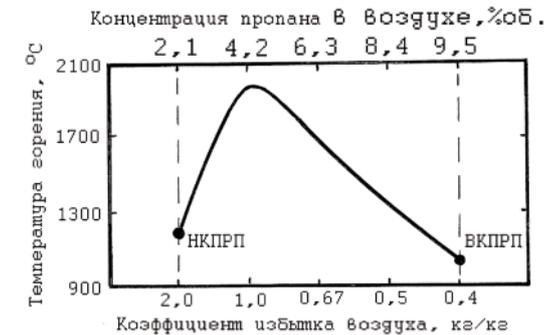
Смеси горючего газа с воздухом способны воспламеняться лишь при определенных концентрациях компонентов, не слишком сильно отличающихся от стехиометрических. Так, смеси газа пропана с воздухом, имеющие стехиометрический состав при содержании пропана 4,2%об.,

могут воспламеняться лишь при концентрациях пропана выше нижнего концентрационного предела распространения пламени НКПРП = 2,1%об., но ниже верхнего концентрационного предела распространения пламени ВКПРП = 9,5%об. Это обусловлено тем, что при концентрациях ниже НКПРП и выше ВКПРП температуры саморазогрева становятся недостаточными для воспламенения горючей смеси /рис. 34/.

Наиболее широкие пределы распространения пламени имеют водород и окись углерода CO : (4 - 75)% и (12,5 - 74)% соответственно /коэффициенты избытка воздуха (9,8 - 0,15) и (2,9 - 0,15) соответственно/.

Повышение исходной температуры горючей смеси расширяет концентрационный диапазон распространения пламени /рис. 35/. Но не столь существенно - согласно методике расчета по отраслевому стан-

Рис.34. Величины термодинамически расчетных температур продуктов сгорания пропан-воздушных смесей при различных исходных концентрациях пропана в воздухе. НКПРП - нижний концентрационный предел распространения пламени пропана, ВКПРП - верхний концентрационный предел распространения пламени пропана.



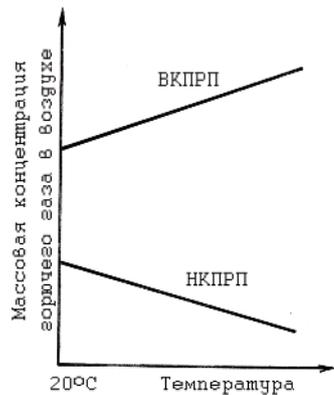


Рис.35. Вид температурной зависимости верхнего и нижнего концентрационных пределов распространения пламени в однородной смеси горючего и окисляющего газов.

дарту СТО Газпрома РД 1.2-138-2005 нижний концентрационный предел распространения пламени при температуре T составляет НКПРП (T) / НКПРП (20°C) = $(1250 - T)/1250 = (1 - 0,0008T)$, где T - температура исходной горючей смеси в $^{\circ}\text{C}$. Так что снижение НКПРП с характерных 1-5% об. до допустимых по евро нормам значений выброса в атмосферу 0,2% об.

возможно лишь при нагреве смесей до 1000°C и выше.

Повышение температуры горючей смеси повышает также и скорость распространения пламени, причем весьма существенно /рис. 36/. Максимальная линейная скорость распространения пламени наблюдается при стехиометрии смесей и в случае углеводородов достигает величин порядка 1 м/сек /рис. 37/.

1.3.2. Горение неперемешанных газов

Рассмотрим случай, когда горючий газ А /слева/ был вначале отделен от окисляющего газа В /справа/ некоей поверхностью - границей раздела Φ /рис.38/. За счет непрерывного хаотического движения молекулы А начинают проникать в зону молекул В, а молекулы В начинают проникать в зону молекул А. Такой процесс называется диффузией молекул. В результате на границе раздела образуется горючая смесь молекул А и В. При наличии источника зажигания на границе /в зонах, где концентра-

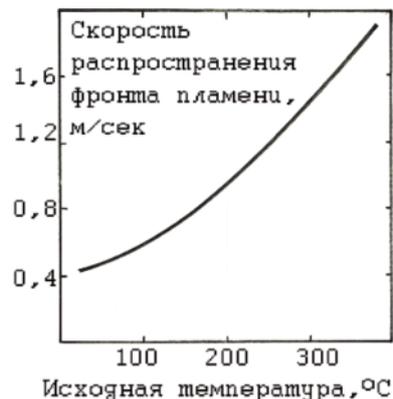
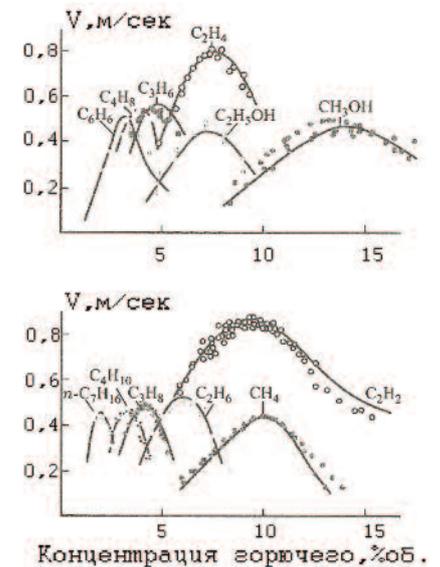


Рис.36. Температурная зависимость линейной скорости распространения фронта пламени в стехиометрической смеси метана с воздухом.

Рис. 37. Линейные скорости распространения пламени по горючим газовым смесям в зависимости от концентрации горючего газа в смеси [22]. Давление атмосферное, исходная температура 20°C .



ция горючего в окислителе установилась в пределах от НКПРП и ВКПРП/ появляется пламя с образованием молекул АВ.

В самом общем случае слева от первоначальной границы раздела находятся газовые смеси с концентрациями горючих компонентов более ВКПРП, а справа газовые смеси с концентрацией горючих компонентов менее НКПРП. Так что газовые среды справа и слева от границы раздела гореть самостоятельно не могут. И возникшее пламя /в виде вспышки/ на границе раздела может затухнуть, если только в эту зону не начнут постоянно поступать молекулы реагентов /компонентов/ с достаточными для устойчивого горения скоростями. Но даже в самом благоприятном случае, граница раздела постепенно неизбежно расширяется с образованием области, занятой продуктами реакции, и возможный контакт горючего и окислителя постоянно ухудшается.

Такая же ситуация наблюдается и в случае факелов - пространственно ограниченных стационарных пламен предварительно не перемешанных газов при непрерывной подаче горючих газов в воздух. Так, например, у основания газовой горелки имеется хороший контакт горючего газа с воздухом /рис. 39/. Но, по мере удаления от среза горелки вверх, толщина зоны между горючим газом и воздухом увеличивается за счет образования продуктов сгорания. Поэтому для непрерывного горения необходимо постоянно удалять продукты сгорания из области раздела горючего газа и воздуха, например, за счет диффузии молекул или за счет свободно-конвективного всплывания горячих продуктов сгорания за счет сил Архимеда. Будет способствовать сближению горючих газов и воздуха и искусственный обдув /"облизывание"/ пламени струей воздуха в наиболее критичном верхнем кончике пламени.

В случае гетерогенного горения перемешанных газов скорость горения - это не линейная скорость перемещения фронта пламени по горючей смеси /как в случае горения перемешанных смесей/, а массовая скорость поступления горючего в зону горения. Скорость горения определяется скоростью диффузионного проникновения горючего /а также и окислителя/ в зону горения. Поэтому пламена при горении не перемешанных газов называются диффузионными пламенами.

А в случае гомогенного горения исходно перемешанных смесей химические реагенты уже находятся в контакте и нет необходимости в диффузии реагентов. Скорость горения определяется только скоростями /кинетикой/ химических реакций в готовой смеси. Поэтому пламена предварительно перемешанных газов называются кинетическими.

В самом же общем случае реализуются смешанные формы горения в виде диффузионно-кинетических пламен. Еще более сложная картина возникает при турбулизации диффузионных пламен /см. раздел 2/, например, в сварочных ацетиленовых газовых горелках. В турбулентных диффузионных пламенах смешение реагентов происходит не только за счет взаимопроникновения отдельных молекул /"по очереди"/, но и за счет взаимопроникновения потоков молекул /конвективных струй/. Но в любом случае окончательное смешение реагентов "до молекул" происходит диффузионно. То есть на больших расстояниях от факела преобладают турбулентности, на малых - диффузия. В бытовых печах встречаются только очень слабо турбулентные пламена в форме извивающихся и взаимно закручивающихся ламинарных факелов.

Характерной чертой ламинарных диффузионных пламен является низкая концентрация горючих и окисляющих газовых компонентов в зоне реакции 2 /рис.40/. Стоит только горючим газам ГГ и кислороду воздуха O_2 появиться в зоне горения 2, они тотчас мгновенно реагируют с образованием CO_2 и H_2O за счет высоких температур зоны реакции.

Рис.38. Возникновение пламени на границе раздела Φ горючего А и окисляющего В газов.

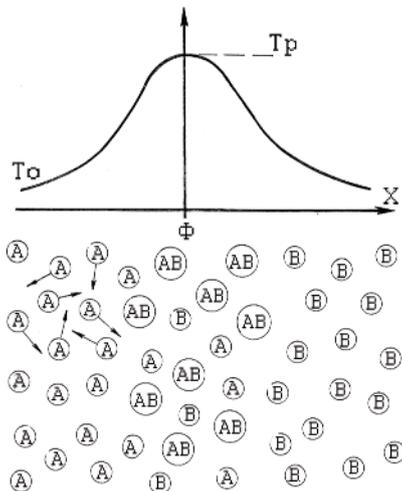
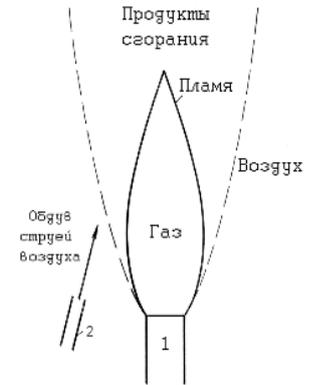


Рис.39. Горение не перемешанных газов на примере схемы пламени /факела/ газовой горелки - горячей струи горючего газа /например, метана/ в атмосферном воздухе. 1 - горелка /трубка для непрерывной подачи газа в неподвижный воздух/, 2 - дополнительная трубка для подачи воздуха для обдува пламени.



Поэтому зона реакции отчетливо видна визуально как светящаяся оболочка пламени. По существу, оболочка пламени и есть само пламя. А внутри оболочки находится относительно холодный горючий газ, постепенно прогреваемый от оболочки и постепенно обогащаемый продуктами реакции и азотом атмосферного воздуха. Горючий газ и кислород разделены и при наличии оболочки пламени никак не могут быть смешаны принципиально.

Факт низкой концентрации горючего и окислителя в оболочке пламени часто смущает печников, поскольку создается ощущение, что оболочка состоит только из раскаленных продуктов реакции, и гореть в оболочке нечему. Ситуация в чем-то схожа с угольной топкой, полной раскаленного шлака /конечного продукта горения как балласта/, в которую понемногу подают воздух и понемногу подбрасывают уголь, который тут же сгорает. И скорости "подачи" и "подбрасывания" определяют уровень тепловыделения и температурные параметры топки.

1.3.3. Строение ламинарного диффузионного пламени

Из дров истекают струи горючих газов /рис.21/, горящие диффузионными пламенами так же, как газы в газовых горелках /рис.39/.

Для пояснения происходящих в "дровяных" пламенах явлений, приведем результаты исследований ламинарных /не турбулизованных/ диффузионных пламен метана в воздухе /рис.41-45/. Видно, что исходный метан, диффундируя в оболочку, постепенно термически разлагается с образованием множества различных промежуточных компонентов с объемными концентрациями N_i - различных углеводородов, короткоживущих радикалов типа OH и C_2 , а также сажистых частиц. И все эти горючие компоненты сгорают в оболочке, поэтому их концентрация в оболочке становится исчезающе малой /рис.41/.

Наблюдаемые пространственные изменения концентраций N_i каждого из компонентов газовой смеси поперек пламени (то есть градиенты

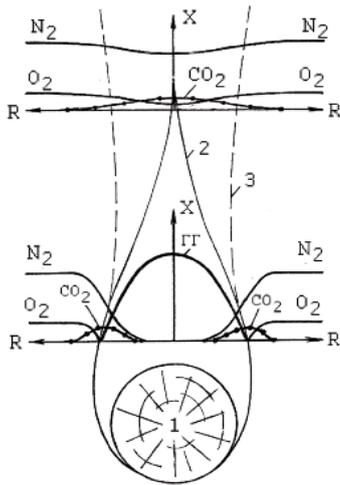


Рис.40. Схема пространственного/поперечного/распределения концентраций горючих газов ГГ/продуктов термоллиза древесины/ и кислорода воздуха в языке "дровяного" диффузионного пламени: 1 - горящее полено /условно/, 2 - светящийся контур /язычок/ диффузионного пламени /оболочка/, 3 - граница зоны /слоя/ продуктов сгорания.

dN_i/dx) определяют скорости диффузии молекул каждого из компонентов /рис.41/. Величины диффузионных потоков $G_i(x) = D_i(dN_i/dx)$ разных компонентов газовой смеси будут определяться собственными градиентами концентрации dN_i/dx и собственными коэффициентами диффузии D_i . Так, скорости диффузии молекул

кислорода и азота заметно отличаются друг от друга, хотя коэффициенты их диффузии близки между собой.

В результате этого, внутри пламени может не сохраняться обычное "воздушное" соотношение концентраций азота и кислородных соединений $[N_2]/[O_2+CO_2+0,5(CO+H_2O)] = 78:21$ /см. раздел 1.5/. Это соотношение может снижаться, например, до 67:21 /рис.41-а/, что соответствует обеднению центральных зон азотом, не вызванному ни разбавлением метаном, ни появлением большого количества паров воды. Отметим попутно, что на распределении концентрации азота в зоне оболочки видно "плато", что объясняется повышением коэффициентов диффузии с ростом температуры.

Не сложно сообразить, что в оболочку пламени диффундирует ровно столько молекул кислорода, сколько нужно для окисления всех диффундирующих в оболочку молекул горючих компонентов. Действительно, если бы горючих поступило бы больше, чем кислорода, то на внешней стороне оболочки возникла бы горючая смесь, которая бы вспыхнула и сдвинула тем самым оболочку пламени во внешнюю кислородсодержащую сторону. Так что встречная диффузия горючего и окислителя автоматически /как ни странно/ создает в оболочке горения строго стехиометрическую горючую смесь.

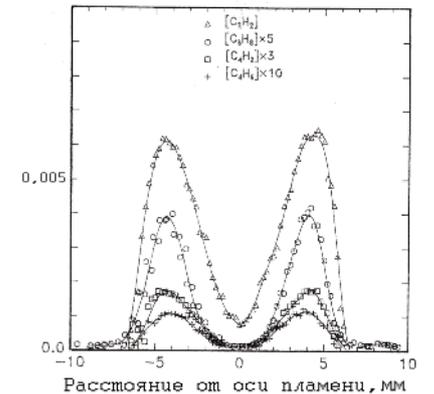
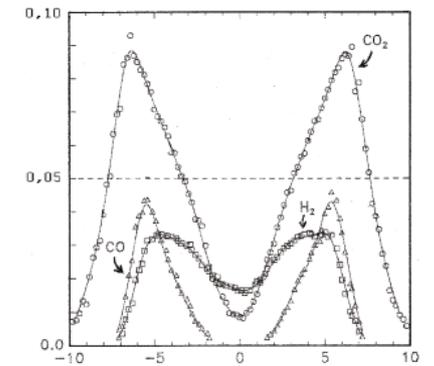
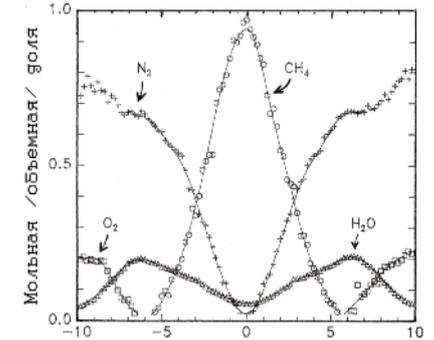
Этот факт значительно облегчает анализ диффузионных пламен. В частности, математический расчет /в предположении равенства коэффициентов диффузии всех компонентов/ показывает, что температура оболочки в этом случае приближается к термодинамически расчетной

температуре горения T_p стехиометрической горючей газовой смеси [31]. Действительно, экспериментально зафиксированные значения температуры диффузионного пламени метана в воздухе достигали 1700°C /рис. 44-а/. Отличия экспериментальных значений температуры от термодинамически расчетной температуры для метана 1950°C объяснялись наличием потерь на излучение.

Если в пламени исходно перемешанной горючей смеси состав исходных реагентов и состав конечных продуктов ясен в каждой точке с самого начала, то в диффузионном пламени концентрации реагентов и разбавителей всюду разные и всюду все время меняются [31]. Это затрудняет и запутывает анализ, поскольку не понятно, сколько же частиц химически реагирует между собой и на разогрев каких масс газов /в том числе пассивных/ уходит теплота реакции.

Именно в этих условиях особую ценность приобретает факт поступления в зону горения строго стехиометрически необходимого количества кислорода. Избыточное количество кислорода в зону горения вообще поступить не может. Таким образом, процессы

Рис.41. Экспериментальные результаты масс-спектрометрических исследований поперечных распределений концентраций /в объемных долях/ химических компонентов газовой смеси в вертикальном факеле - пламени метана в воздухе [25]. Измерения выполнены в поперечном сечении пламени на высоте 9 мм над газовым соплом.



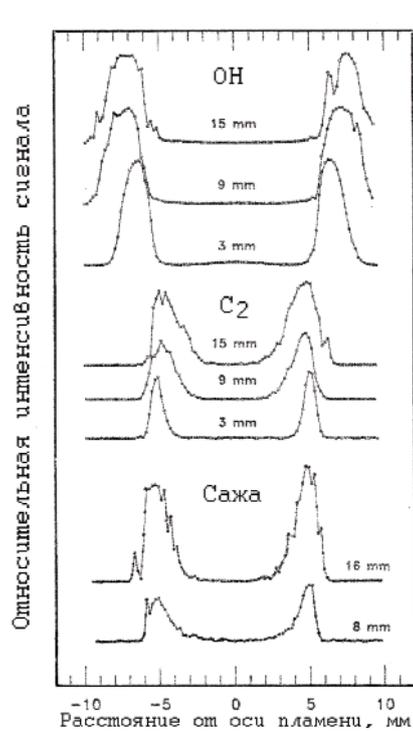


Рис.42. Качественный вид распределений концентраций радикалов OH , молекул диоксида C_2 и сажи в диффузионном пламени метана в воздухе. Цифрами на графиках указаны расстояния поперечных сечений пламени от среза горелки.

горения в оболочке определяются именно концентрацией кислорода в воздухе топки, а не избытком воздуха в топке /хотя избыток воздуха и повышает концентрацию кислорода/.

Поэтому реальная температура горения углеводородов в оболочке диффузионного пламени равна "температуре горения", отвечающей отсутствию избытка воздуха. А потом уже над "сгоревшим" пламенем горячие продукты сгорания смешиваются в топке с избыточным количеством подаваемого в топку воздуха и остывают до "температуры горения", отвечающей реальному избытку воздуха в топке. И именно последние значения температур ошибочно считаются пеничками "температурами горения" в топке /см. раздел 1.6/.

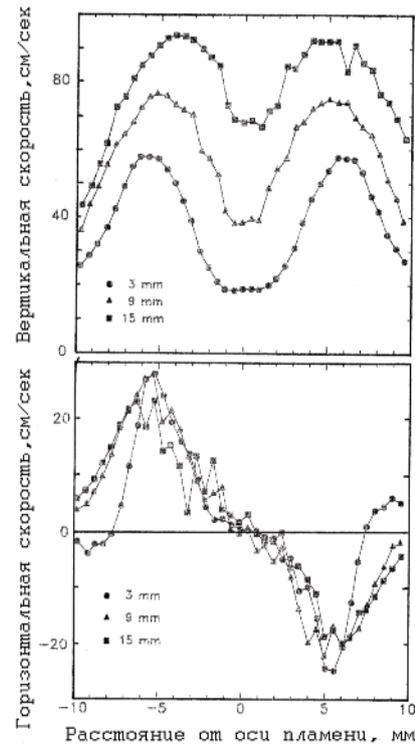


Рис.43. Пространственные распределения вертикальных и горизонтальных составляющих скоростей газовых потоков, замеренные методом Доплера в диффузионном пламени метана в воздухе с помощью лазера с использованием ввода субмикронных частиц окиси алюминия [25].

1.3.4. Форма ламинарного диффузионного пламени

Вышеописанные эксперименты [25] производились на щелевой горелке с прямоугольным газовым соплом /щелью/ длиной 41 мм и шириной 8 мм и двумя обдувочными воздушными соплами /щелями/ по бокам длиной 41 мм и шириной 16 мм /рис.45/. Причем газовые и воздушные сопла заполнены стеклянным бисером для предотвращения напора струй и для выравнивания линейных скоростей потоков по поперечному сечению сопла. Измерения концентрации велись на начальном участке пламени на высотах 1-21 мм от среза сопла. Скорости исходного метана и исходного воздуха составляли соответственно 9,7 и 19,4 см/сек при 20°C. Высота пламени достигала 300 мм.

Тем не менее, уже на высоте 3 мм ширина оболочки пламени увеличивается до 12 мм, что в полтора

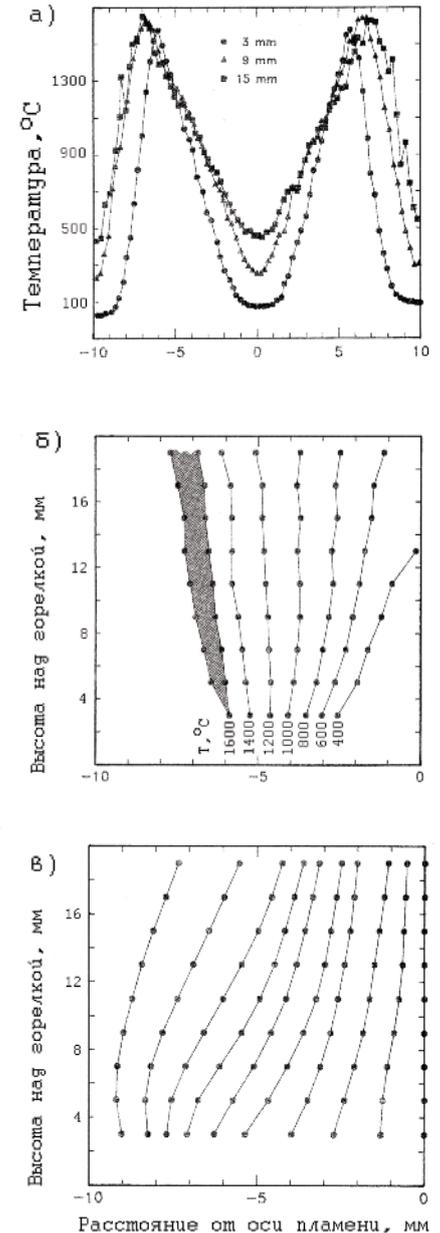


Рис.44. Результаты измерений радиальных распределений температур на разных высотах /а,б/ и направлений газовых потоков /в/ в диффузионном пламени метана в воздухе [25]. Приведены значения температур микротермомпары в пламени, истинные же температуры пламени /из-за охлаждения термомпар тепловым излучением/ выше указанных на 130°C при температуре 1600°C и на 30°C при 1000°C. Термодинамически расчетная температура горения метана в воздухе составляет 1950°C.

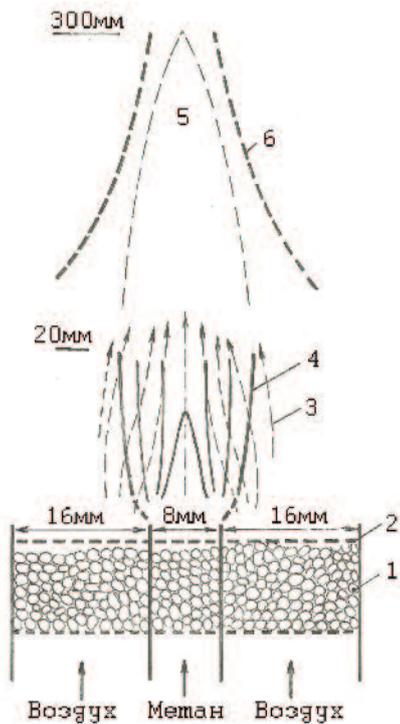


Рис.45. Схема экспериментальной метан-воздушной горелки Вольфгарда-Паркера [25]. 1 - стеклянный бисер диаметром 1 мм, 2 - медная сетка, 3 - направления газовых потоков, 4 - изотермы, 5 - кончик пламени, 6 - проволочный сеточный стабилизатор пламени Кента /типа "чайка"/.

раза больше ширины газового сопла 8 мм. Столь быстрое расширение начального участка пламени иногда объясняют как-бы "раздуванием-накачиванием пламени газом", причем пламя представляется, якобы, "упругим шариком". И хотя горячая газовая оболочка пламени действительно более вязкая, чем холодный метан или холодный воздух, такое объяснение кажется неправдоподобным ввиду отсутствия "упругости пламени" и малости избыточного давления газа на срезе сопла. Не удается объяснить расширение и повышенным давлением /напором/ в струе метана, поскольку скорости истечения

были не велики. Тем более, что уже на начальном участке пламени воздух устремлялся внутрь факела и как бы сжимал пламя, ускоряющееся вверх /рис. 43/. Так что метан опережающе диффундировал навстречу потоку воздуха /рис.44-в/.

Для выяснения вопроса рассмотрим результаты исследования [26] пламени цилиндрической горелки, в которой по внутренней трубке диаметром 25мм подается метан с малой линейной скоростью 1,5 см/сек, а по зазору вдоль внешней трубки диаметром 50мм подается кислородсодержащий газ-окислитель /рис.46/. В случае чистого кислорода пламя метана имело вид практически не расширяющегося факела 1, а в случае воздуха приобретало вид расширяющейся "чашки" 2. Объясняется такой факт изменением мольного стехиометрического соотношения i , равного отношению числа молей /или объемов/ окислителя к числу молей горючего при стехиометрии. Так, при химическом взаимодействии метана с кислородом $\text{CH}_4 + i \text{O}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ мольное сте-

хиометрическое соотношение равно $i = 2$. А в случае химической реакции метана с воздухом $\text{CH}_4 + 10(0,2 \text{O}_2 + 0,8 \text{N}_2) = \text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{N}_2$ мольное стехиометрическое соотношение для воздуха равно $i = 10$. Так что, для создания стехиометрических диффузионных потоков метана и кислорода в оболочку пламени, в случае горения в кислороде требуются большие градиенты концентрации метана внутри факела, то есть малые диаметры факела. А в случае воздуха /то есть разбавленного кислорода/, наоборот, требуются малые градиенты концентрации метана внутри факела, то есть большие диаметры факела.

Аналогично, разбавление метана инертным газом приводит к уменьшению диаметра факела [28]. К уменьшению диаметра пламени приводит также замена метана на водород или на окись углерода, поскольку для реакций $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ и $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ мольное стехиометрическое соотношение имеет меньшую величину $i = 0,5$.

То же наблюдается и при горении дров - уменьшение концентрации кислорода в объеме топливника /за счет снижения избытка воздуха или разбавления воздуха продуктами сгорания/ приводит к образованию широких пламен, порой полностью заполняющих топливник печи.

В случае одновременного снижения концентраций горючих компонентов внутри факела и концентраций кислорода в воздухе вне факела можно добиться сохранения диаметра факела. Но скорость диффузии реагентов в оболочку может стать настолько низкой, что температура оболочки снизится /из-за повышения доли лучистых теплопотерь/ до 1000°C и ниже. При этом скорости химических реакций снизятся настолько, что в оболочке появятся заметные концентрации горючих компонентов и кислорода. Горение пламени переходит в диффузионно-кинетический режим /с темно-красной дымной размытой оболочкой/. И хотя такой режим встречается в горнилах русских печей, мы его рассматривать не будем, поскольку в печах он нежелателен.

Отметим попутно, что факел 2 на рис.46 представляет собой фактически пламя воздуха в метане. Аналогичные пламена могут наблюдаться и в дровяных

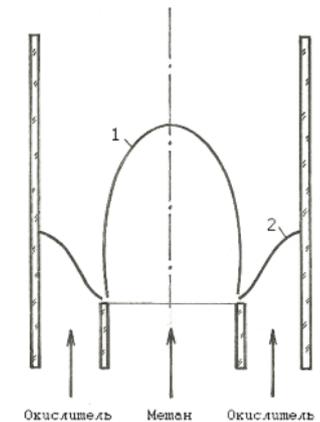


Рис.46. Форма ламинарного метанового пламени в кислороде 1 и в воздухе 2 [26].

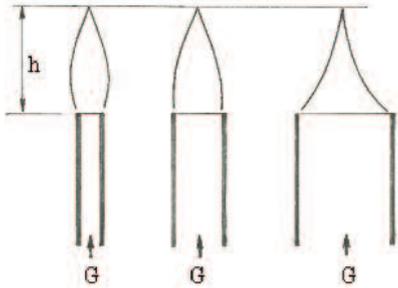


Рис.47. При фиксированном массовом расходе газа G высота пламени h теоретически не зависит от диаметра горелки [22].

печах при воспламенении струй вторичного воздуха в объеме летучих продуктов термоллиза древесины.

Что касается продольных размеров факела, то из простейших диффузионных соотношений следует, что высота /длина/ факела

обратно пропорциональна коэффициенту диффузии D и обратно пропорциональна содержанию кислорода в окружающем воздухе. Высота пламени h пропорциональна объемному расходу горючего газа G и не зависит от диаметра сопла /рис.47/. При неизменности диаметра сопла высота пламени пропорциональна линейной скорости горючего газа в струе [26]. Эти соотношения весьма приближены /рис.48/. Тем не менее, разбиение пламени на N отдельных факелов с сохранением проходного сечения сопел снижает высоту пламен [32] примерно в N раз или в корень квадратный из N раз в случае высоких пламен [6]. Это следует из эмпирических [26] и расчетных [28-31] соотношений для высоты пламени в области больших расходов газа, точнее, в области высоких линейных скоростей газа: $h = 1/[a/V^{0,5} + b/V]$.

То есть, рост высоты пламени с увеличением расхода газа через сопло постепенно замедляется с линейной зависимости на степенную со степенью 0,5 /рис. 51/. А потом при достижении критического числа Рейнольдса горящая газовая струя турбулизируется с резким уменьшением длины /рис.52/.

Часто полагают, что воздушные потоки /в том числе и воздушные турбулизующие струи/ могут, якобы, заохладить пламя и "потушить"

Рис.48. Экспериментальные зависимости высоты пламени от объемного расхода горючего газа при различных диаметрах сопла, указанных цифрами на кривых [24].

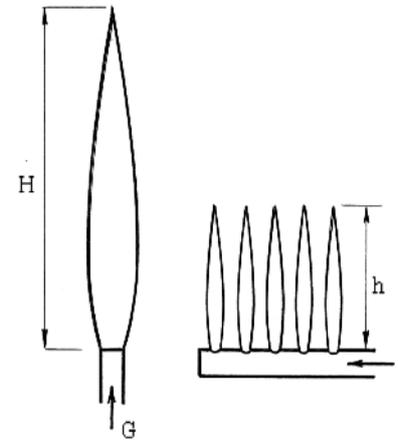
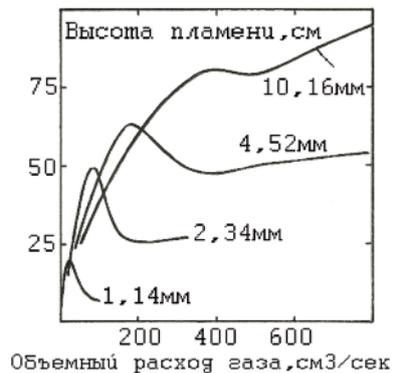


Рис.49. Снижение высоты пламени при разделении одного факела на несколько мелких. Подобная картина известна на примере кухонных газовых плит.

его. В действительности же срывы пламени наблюдаются лишь в случае воздушно-захлаживающего воздействия на источник воспламенения /зону "стабилизации" горения/, например, на испаряющий фитиль свечи или газифицирующееся полено в топке печи. А само пламя сбить /загасить/ воздухом не удастся. Так, перемещением свечи по горизонтали удается "положить пламя горизонтально"

уже при скоростях перемещения V_1 порядка 0,1 м/сек, а потушить пламя при скоростях V_1 порядка 1 м/сек /рис.53/. Однако обдув только кончика пламени /не задевая фитиля свечи/ даже со скоростями V_2 порядка десятков метров в секунду отнюдь не тушит пламя и не образует дымлений - пламя становится просто короче и блее /горячее/.

Вообще говоря, перенос кислорода к пламени на больших расстояниях от пламени всегда осуществляется конвективно /из-за малых градиентов концентраций/, а именно газовыми потоками разного происхождения. Но в непосредственной близости от вязкой /из-за высокой температуры/ оболочки пламени поток кислорода всегда является преимущественно диффузионным даже при наличии сильного турбулентного обдува.

Действительно, конвективный поток кислорода определяется произведением линейной скорости газового потока на концентрацию кислорода в воздухе VN . А диффузионный поток кислорода определяется произведением коэффициента диффузии кислорода в воздухе на градиент концентрации кислорода $D(dN/dx)$. То есть конвективные потоки могут воздействовать на зону горения лишь в случае больших величин радиальных скоростей, а именно при $V > D/\delta = 20$ см/сек, где $D = 0,196(T/273)^{1,8} = 4$ см²/сек - коэффициент диффузии при температурах порядка $T = 1500^\circ\text{K}$ [27], $\delta = 0,2$ см - характерное радиальное расстояние падения концентрации кислорода вблизи оболочки

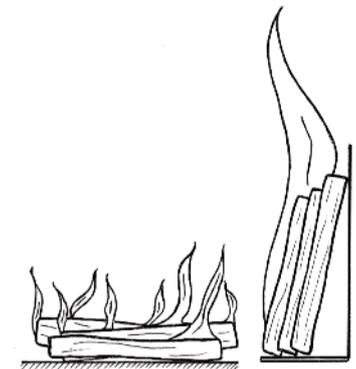


Рис.50. Объединенный факел пламени над дровами имеет большую высоту.

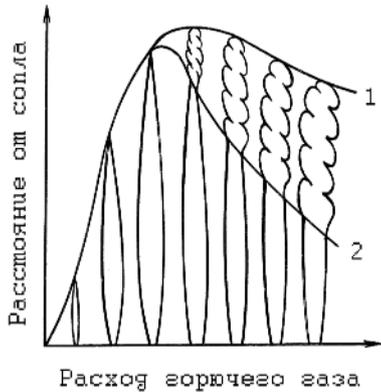


Рис.51. Сокращение длины турбулентного факела с ростом расхода газа.

пламени /рис. 41/. Поскольку в рассматривавшейся выше работе [25] наблюдались радиальные скорости такого порядка /рис.43/, то значит, внешние конвективные потоки могут влиять на структуру пламени, в частности, формировать крутизну профиля температуры на наружной /внешней/ стороне оболочки и плавность профиля температуры внутри оболочки. В то же время ясно, что при наличии сил вязкости качественного

перемешивания газов "до молекул" /для обеспечения реакции горения в оболочке/ невозможно достичь только конвекцией - необходимо и диффузионное смешение молекул.

1.3.5. Дымление горящих дров

Дымовые газы печей, так же как и выхлопные газы автомобилей, при правильной организации процессов сгорания не видимы глазом человека, то есть прозрачны и бесцветны. Но иногда дымовые газы становятся видимыми /дымными, задымленными/ и именуются "дымом".

Оценочную диагностику двигателя внутреннего сгорания производят по цвету дыма из выхлопной трубы. Если цвет дыма белоснежно-белый /как "пар" из чайника/, то значит, что в камеру сгорания подтекает вода из системы охлаждения. Если цвет дыма сизый /серый/, то значит в камеру сгорания подтекает масло из системы смазки. Если цвет дыма черный, то значит, что не успевают сгорать бензин в камере сгорания. Примерно так же /"по трубе"/ производят первичную оценку работы печи.

Белоснежный "дым", появляющийся из печной трубы в морозную погоду при "абсолютно чистом" сгорании дров, представляет собой "клубы" водяного пара /как из чайни-

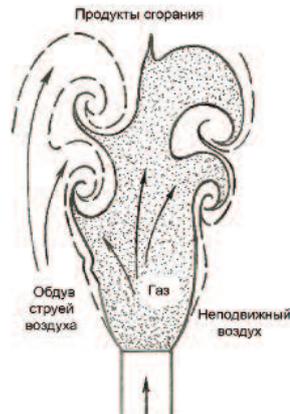
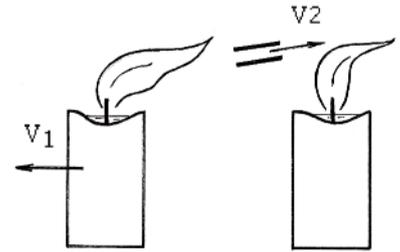


Рис.52. Схема турбулизации пламени. Слева - случай обдува пламени турбулентной спутной струей воздуха. Справа - случай турбулентного потока горячего газа в неподвижном воздухе.

Рис.53. При перемещении свеча гаснет /пламя сдувается с фитиля/. При обдуве струей воздуха кончик пламени разгорается добела, и свеча не гаснет.



ка/. Этот водный конденсат /туман/ печным дымом не считается.

Белый /а фактически серый или бурый/ дым представляет собой туман (объемный конденсат - аэрозоль мелких капелек) жидких продуктов пиролиза древесины /см. раздел 1.1.4/. При нагреве древесины испаряющаяся вода увлекает за собой в виде ассоциатов и пары масел /"дегтей"/. Ведь кипящая вода, как известно, хорошо "перегоняет" /испаряет, переводит в летучие/ многие углеводороды, особенно ароматические, что собственно и придает белому дыму специфический запах "копоти" тлеющей древесины /сухая "органика" не пахнет/. Эти пары воды с "детьями", образовавшиеся внутри полена вблизи раскаленной зоны горения или тления, сочатся по трахеидам холодной древесины, охлаждаются, конденсируются в туман в виде белого дыма и выходят из древесины /преимущественно через торцы поленьев/. Не воспламеняясь, не сгорая и не испаряясь, белый дым может проходить мимо пламен в хайло топливника, а затем и в дымовую трубу /рис. 54/. Такой случай наблюдается при растопке печи, а также при тлении дров. Так что, если из трубы идет "тяжелый" белый /серый/ дым, то значит, пламя не охватывает полностью все поленья. Именно этот белый дым используется для копчения мясных и рыбных продуктов в качестве фенолсодержащего консерванта.

По мере разгорания полена белый дым начинает испаряться и, наконец, вспыхивает языками пламени. Чем горячее стенки топливника, тем быстрее испаряются жидкие капельки белого дыма /см. раздел 5.9/. При этом белый дым может пропасть совсем. Также

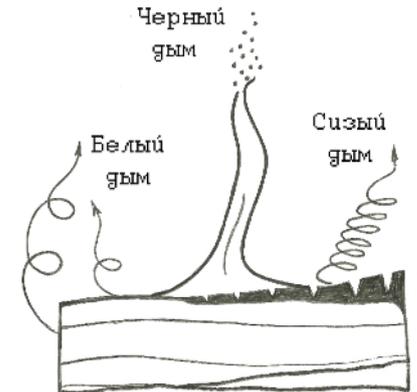


Рис.54. Места образования белого /серого, бурого/, сизого и черного дыма.

Исходные углеводороды

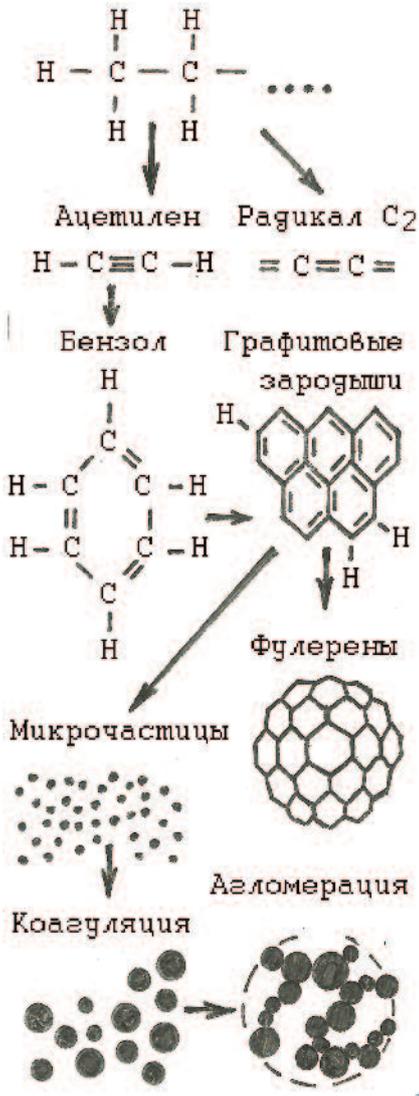


Рис.55. Схема образования черного дыма.

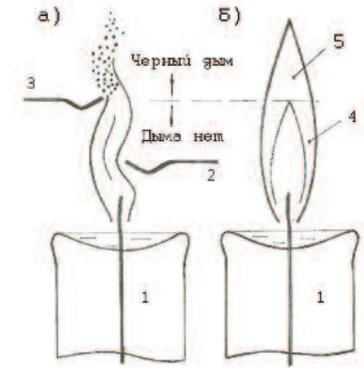
ясно, что чем короче поленья, тем ближе к огню выходит белый дым и тем легче белый дым испаряется и сгорает. А топливные пеллеты /прессованные таблетки мелко дробленной древесины обычно диаметром 6мм и длиной 5-15 мм/ при горении в печах вообще практически не дымят белым дымом, поскольку все продукты термоллиза из мелких “поленьев” дробленной древесины тотчас попадают в контакт с зоной пламени и сгорают “под шапкой огня” /рис.54/.

Если же белый дым испарился в топливнике, но сгореть не смог, то “пары белого дыма” поступают в дымовую трубу, где, охлаждаясь, могут вновь сконденсироваться, но уже при повышенных температурах /то есть без участия воды/ в виде полупрозрачного “сизого” дыма /масляного “чада”/.

Отметим, что “испарившийся белый дым” может конденсироваться совместно с водяными парами и на стенках дымовой трубы, образуя известный пахучий трубный конденсат в виде струек росы. А вот белый дым не охотно осаждается даже на холодных поверхностях, как и все туманы.

Кроме того, сизый печной дым может исходить из раскаленных обугленных /но не горящих пламенем/ поверхностей поленьев, в том числе и тлеющих головешек /рис.54/. Такой сизый дым образуется в результате испарения и последующей высокотемператур-

Рис. 56. Эксперимент с парафиновой свечой: а - при касании чайной ложкой верха пламени /кончика/ возникает черный дым, при касании же низа пламени дым не возникает, б - зона появления дыма располагается выше смыкания визуально темного ядра пламени /см. далее зону 5 на рис.302/. 1 - свеча, 2 - положение ложки при отсутствии дымления, 3 - положение ложки при появлении дыма, 4 - темное ядро пламени, обусловленное наличием холодных паров парафина, 5 - зона, в которой сильно разбавлены пары парафина и при касании которой даже раскаленным предметом возникает дымление.

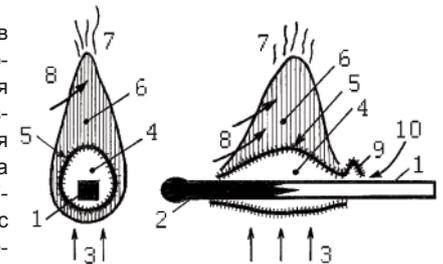


ной конденсации в туман наиболее труднокипящих масел и смол /см. разделы 5.9.2.2 и 5.10/. Причем, чем более высококипящей является конденсирующаяся смола, тем “суше и легче” выглядит сизый дым.

Сизый дым, как и белый дым, тоже является “дегтем” - “органическим углеродом”, но только более высококипящей фракцией. Сизый дым отличается от белого дыма значительно меньшим размером частиц. А мелкие частицы /и жидкие, и твердые/ размером меньше 400 нм преимущественно рассеивают видимый свет в фиолетовой области спектра, а не поглощают его как крупные частицы белого дыма. Поэтому переход от “тяжелого влажного” белого /серого, бурого/ дыма, не прозрачного в луче лазерной указки, к “легкому сухому” сизому дыму, практически не рассеивающему луч лазерной указки, происходит постепенно через серовато-голубоватые дымки, знакомые как дымок сигареты.

Черный дым является “обгоревшим дегтем” /“элементарным углеродом”, сажей/. Черный дым возникает при терморазложении углеводов, преимущественно именно в пламени, при недостаточном окислении. Черное дымление более характерно для углеводородов, богатых

Рис.57. Схема пламени свечи. 1- остов спички /осиновая палочка, пропитанная ортофосфорной кислотой для предотвращения тления/, 2 - обгоревший оств, 3 - подсос воздуха, 4 - прозрачная область, заполненная продуктами термоллиза, 5 - голубая полоска пламени, 6 - светящееся желтое пламя, 7- черный дым /копоть/, 8 - “вторичный” подсос воздуха, 9 - первичное голубое пламя кинетического горения перемешанной смеси.



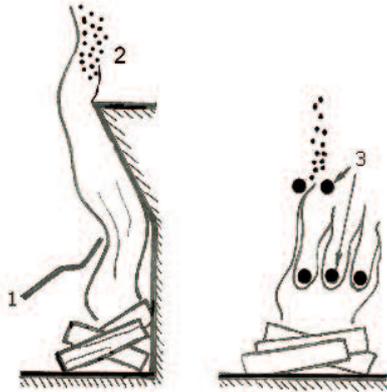


Рис.58. Касание кочергой 1 нижней части пламени дров в камине не приводит к дымлению, а зуб камина 2 или высоко расположенная решетка 3 вызывает дымление.

углеродом и, особенно, содержащих бензольные кольца /бензол, мазут, полистирол/. Это явление используется при производстве сажи для резин, красок и т.п. Пламена же термически стабильных газов /водорода, окиси углерода/ черного дыма не образуют.

Исходные углеводороды в ходе термического разрушения в восстановительной среде в глубине факела образуют множество продуктов /рис.41/. При этом специфическим свойством именно углерода является образование /преимущественно через ацетилен/ ароматических соединений - однокольцевых шестичленных структур типа бензола, затем двухкольцевых /нафталиновых/, трехкольцевых /антраценовых/ и так далее до образования многокольцевых структур, представляющих собой фрагменты решетки графита и выступающих в роли зародышей сажи /рис.55/. Эти зародыши имеют размер порядка 0,5 нм и фактически являются крупными молекулами непредельных углеводородов.

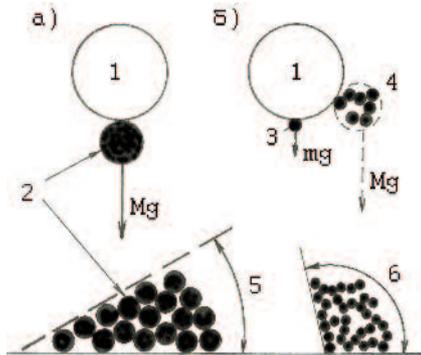


Рис.59. Пояснение явления комкуемости высокодисперсных порошков: а) - крупные частицы 2 низкодисперсного порошка, обладающая высокой массой M , не в состоянии удержаться на подложке 1 /потолке, соседней частице/ и на горизонтальной поверхности рассыпаются с малым углом откоса 5, б) - мелкие частицы 3 высокодисперсного порошка, обладающая малой массой m , не могут преодолеть своим весом mg силы адгезии и прилипают к подложке /к потолку, к соседней частице/ и на горизонтальной поверхности могут создавать углы откоса 6 более 90 градусов. Высокодисперсные порошки могут пересыпаться лишь комками 4 /агломератами, агрегатами/ большого веса Mg .

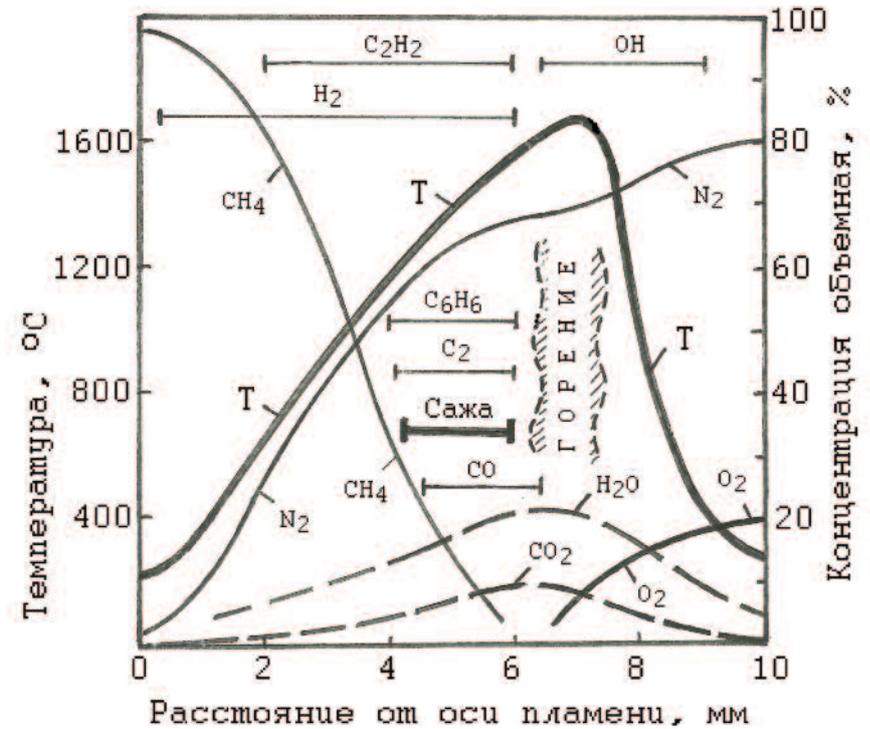


Рис.60. Распределения температуры и концентраций компонентов в ламинарном пламени на высоте 9 мм над срезом газового сопла /см. рис.41-44/. Горизонтальными отрезками обозначены радиальные месторасположения ряда компонентов - концы отрезков отвечают зонам с концентрациями в половину от максимальных. Под сажей здесь понимается не черный дым, видимый глазом, а микрочастицы - зародыши углерода, электризирующиеся в пламени и в раскаленном виде придающие пламени желтый цвет [25].

В последние годы установлено, что пластинчатые зародыши могут сворачиваться в шаровые C_{60} (фуллерены) или цилиндрические (нанотрубки) структуры. На эти раскаленные зародыши начинают конденсироваться осколки бензольных колец и молекулы ацетилена C_2H_2 , причем последний является непременно спутником зажеобразования /именно поэтому, по-видимому, пламена бензола и ацетилена сильно коптят/. В результате образуются некие сферические микрочастицы размером порядка 5 нм, которые уже начинают приобретать свойства твердой фазы. Поясним, что здесь и далее 1м (метр) = 10^3 мм (миллимет-

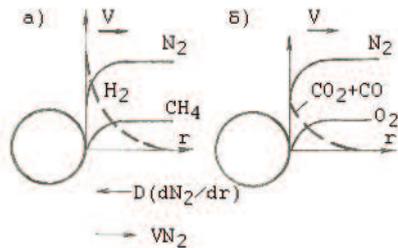


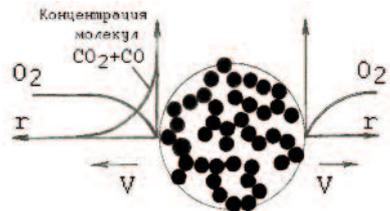
Рис.61. Возникновение газовых потоков V , препятствующих сближению частиц между собой: а) - при осаждении углерода на поверхность зародыша сажи из каждой молекулы метана CH_4 образуется две молекулы водорода. Поэтому возникает "водородный ветер", дующий от поверхности зародыша, б) - при горении микрочастицы сажи из каждой молекулы кислорода образуется до 1,5-2 молекул CO и CO_2 .

ров) = 10^6 мкм (микрометров, то есть микрон мк) = 10^9 нм (нанометров, то есть миллимикрон ммк).

Микрочастицы сажи могут расти по разному - путем коагуляции микрочастиц /дальнейшего укрупнения шаровидных микрочастиц путем нарастания все новых слоев углерода при конденсации ацетилена/ или путем агломерации-агрегации микрочастиц /образования комков-агрегатов при столкновении микрочастиц/. Эти процессы идут параллельно, но обычно считают, что коагуляция идет до размера частиц порядка 50нм и придает свечению пламени желтый цвет. А затем в определенных условиях при нехватке кислорода быстро идет агломерация до размера комков-агрегатов до 500нм и выше. Именно эти агрегаты сажи в виде газозвеси воспринимаются как черный дым.

Легко проверить, что черный дым возникает лишь в верхней части пламени /рис.56-58/. В нижней же части пламени дымление не наблюдается даже при погружении в желтое пламя холодного предмета.

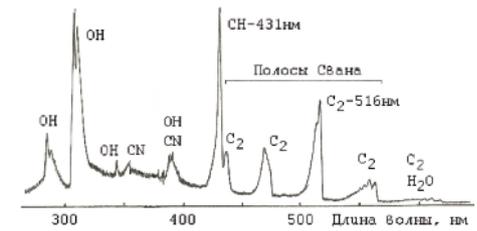
Процессы сажеобразования изучены пока недостаточно. Но ясно одно - если в какой-то момент становится возможной агломерация частиц, то тогда и возникает черный дым, видимый глазом. Это обусловлено тем, что газозвеси микрочастиц с малым размером частиц 50нм могут лишь рассеивать коротковолновое /синее/ излучение видимого



спектрального диапазона и глазами либо не видны или видны как "сизый" дым /опалесцирующий/. А газозвеси с более крупными размерами агрега-

Рис.62. При горении агрегата микрочастиц сажи доступ кислорода внутрь агрегата ограничен поверхностной выработкой кислорода.

Рис.63. Характерный спектр излучения углеводородного пламени в видимой области спектра.



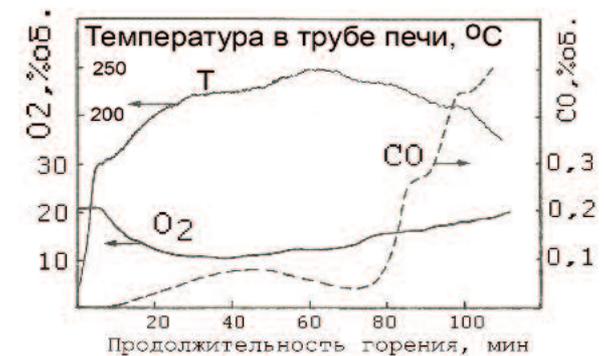
тов частиц 500нм уже достаточно сильно поглощают оптическое излучение видимого спектрального диапазона.

Поверхность агрегатов сажи пористая и имеет степень черноты близкую к единице. Агрегаты сажи вполне устойчивы и не могут рассыпаться самопроизвольно на составляющие микрочастицы /рис.59/.

В то же время, подсвечивая фонариком или лазерной указкой, нетрудно убедиться, что желтое пламя свечи или спички является прозрачным. Действительно, при мощности сгорания свечи порядка 50 Вт, на тепловое ИК-излучение приходится не более 6-10 Вт. Если бы степень черноты пламени свечи была бы близкой к единице, то мощность теплового ИК-излучения превысила бы мощность конвективного потока над свечой. Значит, пламя свечи не содержит крупных агрегатов сажи. Собственно поэтому сажа в свече и успевает сгорать.

Учитывая, что сажа первично образуется в зоне разрушения углеводородов /рис. 60/, можно предположить, что 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" V , дующий от частицы и препятствующий сближению и объединению частиц в агрегат /рис.61/.

Рис.64. Временная зависимость температуры дымовых газов T , концентрации кислорода O_2 и окиси углерода CO /угарного газа/ в дымовых газах при топке экспериментальной дровяной печи Американской ассоциации печников <http://heatkit.com/research/2007/lopezh06.html>.



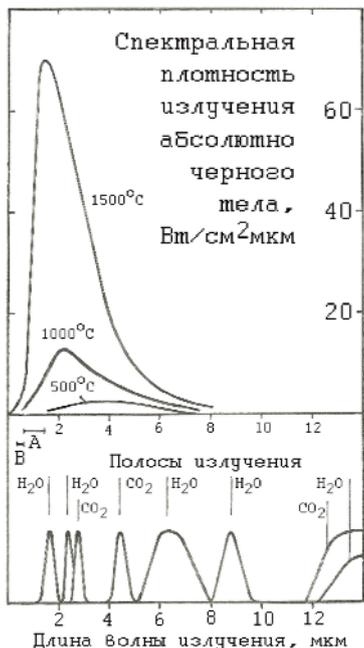


Рис.65. Внизу - инфракрасный спектр излучения пламен углеводородов. Вверху - спектральное распределение интенсивности излучения абсолютно черного тела /кривая Планка/, выше которой интенсивность излучения пламени при заданной температуре подняться не может. А - спектральный А-диапазон ИК-излучения. В - диапазон видимого глазом излучения..

В кончике же пламени, где богатые водородом углеводороды уже отсутствуют, роль роль “ветра” играет СО, образующийся в ходе реакций горения $3C + 2O_2 = 2CO + CO_2$ и $C + CO_2 = 2CO$ /из рис. 60 следует, что окисление сажи происходит в бескислородной зоне посредством реакции с CO_2 /. В процессах горения подобный “ветер” известен как “стефановский поток” V /рис.61-б/. Он образуется также и в средах, одновременно содержащих пассивный азот. Именно для “зануления”

потока азота на реагирующую поверхность приходится вводить конвективный член, означающий появление “стефановского потока” V. 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 микро-частицам сажи быстро агломерировать и образовывать черный дым.

Отметим, что крупные комки сажи окисляются лишь с поверхности, поэтому сгорают медленно /рис. 62/. В то же время, крупные частицы /в отличии от мелких/ могут при горении нагреваться значительно выше температуры окружающего газа. Это следует из простейших уравнений теплопроводности. 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 осаждаются белый 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 газовзвеси, а также горящие фрагменты древесного топлива в виде искр-треков или витающих ворсинок, листочков, веточек, представляющих пожарную опасность.

В заключение напомним, что при наличии в исходном углеводороде даже небольших количеств кислорода, зародыши сажи могут сгорать в ходе своего образования. Черный дым при этом может не возникать - пламя теряет желтое свечение, становится прозрачно-голубым. Такая форма горения “частично предварительно перемешанных газов” широко используется в горелках кухонных газовых плит. В случае дров такой режим горения реализовать не удастся, поскольку ввести воздух внутрь каждого полена невозможно.

1.3.6. Оптическое излучение пламени

Цвет свечения /видимого оптического излучения/ тела определяется длиной волны излучения в пределах спектральной чувствительности человеческого глаза 380-750нм. Фиолетовый цвет соответствует длинам волн (380-420)нм, синий (420-490)нм, зеленый (490-530)нм, желтый (530-590)нм, оранжевый (590-650)нм, красный (650-750)нм.

Типичный спектр оптического излучения углеводородного пламени в видимой области содержит две важные полосы /системы, группы/ спектральных линий, определяющих цвет пламени /рис.63/. Это полоса углеводородного радикала СН с



Рис.66. Спектральная прозрачность слоев воды (1), оконного стекла натриево-силикатного состава (2), кварца плавленного оптического (3) и флюорита - фторида кальция CaF₂.

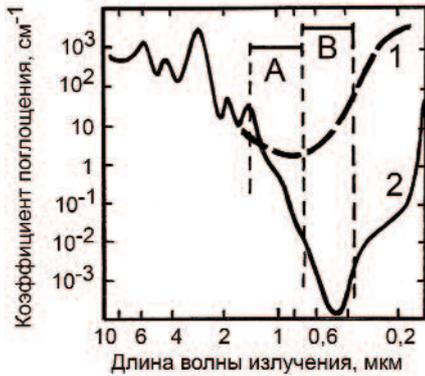


Рис.67. Спектральная зависимость коэффициента поглощения света мягкими тканями организма человека (1) и водой (2) [43]. А - спектральный А-диапазон ИК-излучения. В - видимая область спектра.

длиной волны излучения 431нм, придающая пламени синий цвет, и полоса молекулы диуглерода С₂ с длиной волны излучения 516 нм, придающая пламени зеленый цвет [34-36]. Зеленый цвет характерен для высокотемпературных пламен,

содержащих большое количество углерода /например, для пламени полистирола или полиэтилена/. Интенсивная полоса радикала гидроксида ОН 306 нм находится в ближнем ультрафиолете за пределами обычной видимости человеческого глаза /и может придавать слабобактерицидные свойства излучению открытого костра/. Полосы ОН 343нм и СН 387нм могут придавать пламенам фиолетовый оттенок.

Так что частые бытовые домыслы о том, что наблюдаемые в печах

при догорании дров голубые “огоньки” /слабые всполохи голубых пламен/ означают горение угарного газа СО, вообще говоря, являются неправильными. Догорает, может быть, и угарный газ, но с остаточными /порой, может быть, и следовыми/ количествами углеводородов “из полена” с синим свечением именно спектральной полосы углеводородного радикала СН 431нм. А вот после погасания голубых “огоньков” при догорании древесных углей, концентрация угарного газа в топке

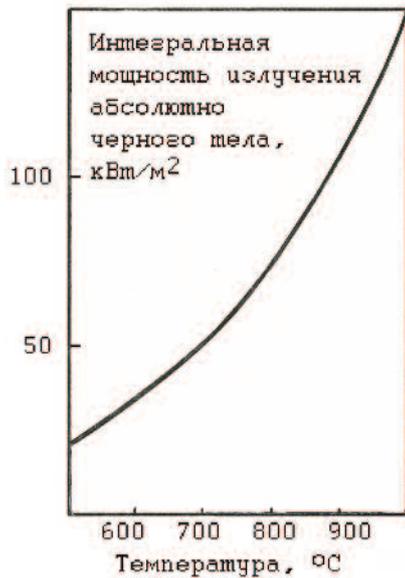
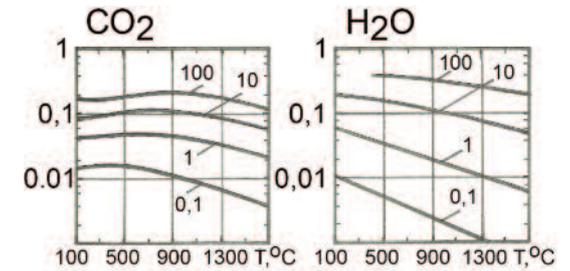


Рис.68. Температурная зависимость мощности излучения абсолютно черной поверхности σT^4 интегрально по всему спектру/.

Рис.69. Температурные зависимости степеней черноты ϵ газовых слоев углекислого газа /слева/ и водяных паров /справа/ разной толщины [41]. Числа на кривых соответствуют оптическим толщинам газовых слоев, равным произведениям парциального давления /углекислого газа или воды/ в кПа /1 атм = 100кПа/ на толщину слоя в метрах.



печи может сильно возрастать, что требует предосторожностей при расположении открытых каминов в жилых помещениях. Даже после очень “чистого” пламенного сгорания дров, беспламенное догорание углей может дать резкий рост /скачек/ концентрации угарного газа /рис.64/.

Пламя же окиси углерода СО в воздухе дает в видимой области сплошной “белый” спектр 300-500нм, отвечающий “высвечиванию” образующихся возбужденных молекул СО₂* [36]. Отметим, что слабосветящиеся пламена водорода Н₂ и окиси углерода СО в воздухе имеют окраски в основном из-за наличия примесей углеводородов.

В невидимой для человеческого глаза инфракрасной области спектра располагаются спектральные полосы излучения трехатомных газов - воды Н₂О и углекислого газа СО₂ /рис.65/. Интенсивность излучения этих полос ограничена сверху спектральными кривыми излучения абсолютно черного тела по формуле Планка [37-40]. Напомним, что излучение Солнца примерно отвечает излучению абсолютно черного тела при температуре 5600°С со спектральным максимумом излучения в районе 400-500нм.

Инфракрасное излучение /ИК-излучение/ пламен называется тепловым, поскольку вносит определяющий энергетический вклад в лучистый поток от пламени. С увеличением температуры пламени вклад более коротковолновых полос излучения растет из-за сдвига длины волны максимума излучения $\lambda_{\text{макс}}$ абсолютно черного тела по формуле Вина $T\lambda_{\text{макс}} = 2,9 \cdot 10^3$ мкм.град, где Т - абсолютная температура в °К, равная 273+Т°С, где Т°С - температура в градусах Цельсия. Причем если суммарную площадь под кривой Планка принять равной 100%, то площадь под восходящей ветвью $\lambda < \lambda_{\text{макс}}$ составит 25%, а площадь под нисходящей $\lambda > \lambda_{\text{макс}}$ ветвью составит 75% суммарной площади под кри-

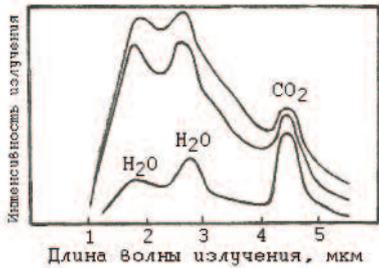


Рис.70. Спектры пламен разной толщины при пожарах над деревянными срубами. Пики интенсивности излучения соответствуют излучению молекул воды и углекислого газа [42].

вой Планка. Поэтому полосы излучения (8-14)мкм, важные для теплового баланса жилых помещений /а также Земли и атмосферы/, не играют

заметной роли в тепловом балансе пламён, где основными теплонесущими становятся полосы излучения в области (1-8)мкм.

Инфракрасное излучение подразделяют на А-диапазон (750-1500)нм = (0,75-1,5)мкм, прозрачный для воды и тканей организма человека, на В-диапазон (1,5-3,0)мкм, прозрачный для оконного стекла, и С-диапазон с длинами волн более 3,0мкм /рис.66/.

Поэтому при высоких температурах пламени может оказаться существенным инфракрасное излучение А-диапазона (0,75-1,5)мкм /см. зоны А на рис.65 и 67/, способное проникать в ткани человека и тем самым оказывать более “мягкое” /более легко переносимое за счет съема тепла текущей кровью/ тепловое воздействие на кожу, чем более “жесткое” длинноволновое инфракрасное излучение с длинами волн порядка 10мкм от радиаторов водяного отопления /рис.67/.

Интегральная мощность теплового излучения абсолютно черного тела во всем спектральном диапазоне в полупространство равна σT^4 , где $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²град⁴ - постоянная Стефана-Больмана, Т - абсолютная температура в °К /рис. 68/. Мощность же теплового излучения реальных объектов /твердых поверхностей или слоев газа/ равна $\epsilon \sigma T^4$, где ϵ - степень черноты, меньшая единицы /рис. 69/. Поэтому сажистые частицы, при-

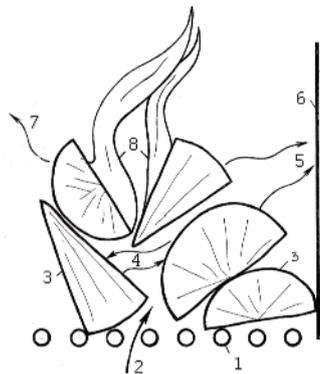


Рис.71. Дрова в топке печи горят в “микротопках” между поленьями. Наружные стороны поленьев, обращенные к холодным /при растопке/ стенкам топки, горят плохо из-за больших потерь на тепловое ИК-излучение. 1 - решетка, 2 - поток первичного воздуха, 3 - поленья, 4 - “микротопка” между поленьями, в которой осуществляется взаимный нагрев поленьев тепловым ИК-излучением, 5 - лучистые ИК-потери на холодные стенки топки, 6 - холодная стенка топливника, 7 - лучистые ИК-потери в окружающую среду, 8 - языки пламени в “микротопке”.

дающие факелу желтый цвет и повышающие черноту пламени ϵ , могут увеличивать тепловую светимость пламени. Но поскольку пламена многих углеводородов с микрочастицами сажи прозрачны в видимой /а тем более в инфракрасной/ области спектра, то в промышленных печах иногда специально добавляют в пламена сильно коптящие добавки /керосина, мазута и т.п./, способствующие агломерации частиц сажи.

Свечение сажистых частиц в видимой области спектра 380-750мкм /см. зону В на рис.65/ не вносит определяющий вклад в общую мощность излучения сажи при пламенных температурах. По цвету свечения можно оценить температуру излучающих частиц /или иных раскаленных поверхностей/:

- темно-коричневый, заметный только в темноте	500°С
- коричнево-красный	600°С
- темно-красный	700°С
- вишнево-алый	800°С
- красный	900°С
- оранжевый	1000°С
- желтый	1100°С
- светло-желтый	1200°С
- белый	1300°С и выше.

Реальные спектры горения древесины в толстых оптических слоях подтверждают наличие молекулярных полос излучения на фоне сплошного фона излучения частиц сажи /рис.70/.

1.3.7. 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 /см. далее раздел 5.6/.

Второй особенностью горения дров в печах является коллективный характер сжигания поленьев, поскольку в одиночку поленья могут гореть только в сильно раскаленной топке. По существу, поленья горят в зазорах между поленьями как в микротопках с раскаленными обугленными стенками из древесины /рис.71/. Причем горят зачастую не сообразуясь с устройством и с текущим состоянием топливника печи. Такое горение называется костром /рис.72/. Ясно, что внутри костра может возникать нехватка кислорода для полного сжигания летучих, и костер превращается в “газогенератор”, поставляющий горючие газы в пламя над дровами /см. далее раздел 5.7.1.1/.

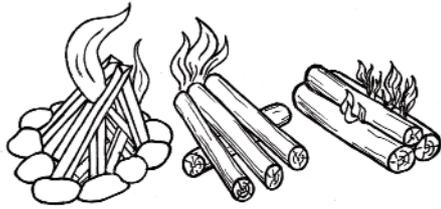


Рис.72. Разные типы бытовых костров.

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. Поэтому каждый язык пламени /факел огня/ то возникает, то исчезает, то меняет направление, в том числе и из-за пульсаций горения соседнего языка пламени. В условиях тесноты в топке возникает “вакханалия огня”, в которой, с первого взгляда, разобраться очень трудно. Такая картина подчас не имеет ничего общего с картиной одиночного стационарного газового факела пламени.

Так, легко убедиться, что при поднесении к пламени свечи еще одного пламени /например, от кухонной газовой зажигалки/ могут возникать либо сильные удлинения одного из пламен, либо неожиданно возникающие неустойчивости горения, визуально проявляемые как попеременные метания, трепетания пламен /рис.73/.

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 $\alpha = (2 - 3)$.

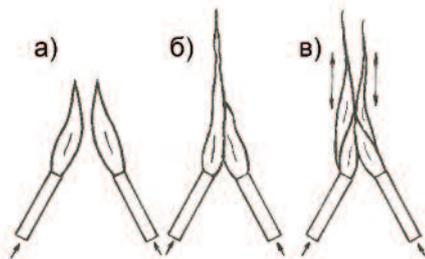


Рис.73. Взаимное влияние языков пламени. Два языка пламени (а) при сближении дают удлиненное пламя одного из языков (б), поскольку один язык пламени хоть и нагревает кончик другого, но при этом ограничивает подачу в него кислорода. В этом режиме могут возникать неустойчивости - трепетания языков пламени, когда попеременно удлиняется то один, то другой язык пламени.

1.4. Тление древесины

Тлением называется беспламенная форма горения твердых топлив, когда кислород взаимодействует непосредственно с поверхностью конденсированной фазы. Тление характерно тем, что может происходить медленнее, чем пламенное горение, и может осуществляться при относительно низкой температуре горения. Тление могут поддерживать многие вещества - древесина, уголь, пластмассы, табак, хлопок и другие.

В технической литературе всегда специально подчеркивается, что под тлением понимается не просто окисление горючего /пусть даже с наличием некоторого саморазогрева/ и не просто терморазложение вещества /топлива/ под действием внешнего источника тепла /например, пиролиз древесины/. Тление /как и пламя/ является именно горением /но не газов, а углей/, то есть процессом, когда окисление приводит к столь существенному саморазогреву горючего /роль которого в нашем случае выполняют не дрова, а именно продукты пиролиза древесины/, что скорость химической реакции окисления горючего вдруг самопроизвольно скачком возрастает многократно. При этом потенциальные возможности потребления кислорода горючим в очаге воспламенения могут превысить реальные возможности поступления кислорода в очаг воспламенения /возгорания/.

Напомним, что если скорость горения /массовая скорость образования продуктов сгорания/ лимитируется скоростью химической реакции окисления, то такой режим горения называется кинетическим. Если же скорость горения лимитируется /ограничивается/ скоростью поступления кислорода в зону горения, то такой режим горения называется диффузионным /поскольку, как правило, кислород поступает в зону реакции в результате диффузии/.

При низких температурах скорость окисления древесины пренебрежимо мала ввиду отсутствия самих окисляющихся веществ, и нагрев древесины приводит лишь к повышению теплопотерь /см. точку “окисление” на рис. 74-а/. При повышении температуры в результате обугливания древесины появляется древесный уголь, скорость окисления которого быстро растет с

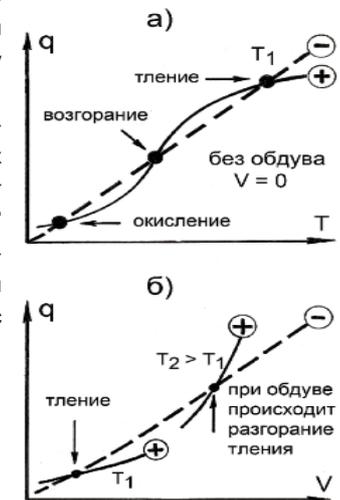


Рис.74. Энергетические балансы процессов окисления как соотношения величин тепловыделения (+) и теплопотерь (-): а - влияние температуры /то есть скорости окисления/, б - влияние скорости обдува тлеющей поверхности /см. текст/.

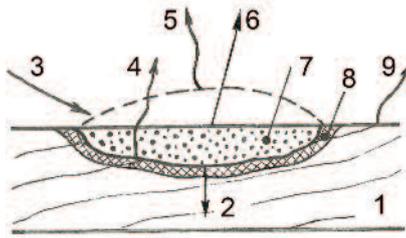


Рис.75. Схема пятна тления на поверхности древесины. 1 - древесина, 2 - поток тепла вглубь древесины, 3 - поступление воздуха, 4 - выход летучих из зоны термоллиза через угольный слой /с воспламенением-пламенем или в виде сизого дыма/, 5 - "шапка" отходящих продуктов тления CO_2 и CO , 6 - лучистый поток тепла, 7 - зона углей, 8 - зона термоллиза древесины, 9 - выход летучих из пор древесины с конденсацией в форме белого дыма.

температурой экспоненциально $\exp(-E/KT)$, и в точке "возгорание" тепловыделение начинает превышать теплотери, начинается саморазогрев древесины. Затем по мере разгорания кинетический фактор $\exp(-E/KT)$ перестает расти и становится близким к единице, а летучие из полена начинают препятствовать допуску кислорода к древесине, в результате в точке "тление" достигается горение с динамически устойчивым энергетическим балансом /рис.74-а/. При появлении же обдува воздухом поступление кислорода к обугленной поверхности возрастает, что приводит к дальнейшему разгоранию тлеющей древесины с возможным переходом в пламенное горение /рис.74-б/.

Как мы уже отмечали, горит не сама по себе древесина, а продукты ее термического разложения - летучие и угли. Если горят летучие /над древесиной/, то имеем пламенное горение. Если горят угли, то имеем тление. В общем случае, тление и пламенное горение происходят одновременно /параллельно/ и дополняют друг друга.

Возгорание /появление тления/ древесины очень часто порождает возникновение воспламенения /появление пламенного горения/ древесины. В свою очередь пламенное горение древесины обычно завершается тлением древесных углей. При любом процессе тления мы имеем дело с беспламенным поверхностным горением древесных углей. Но при возгорании древесины слой древесного угля тонкий и расположен на поверхности древесины, и следует учитывать тепловые потери на прогрев теплоемкой и теплопроводной древесины, в том числе и на выпаривание воды. А при тлении древесных углей тепловые потери минимальны ввиду малой теплоемкости и теплопроводности углей.

Отметим попутно, что древесные угли, образующиеся при пиролизе древесины, могут быть очень активными, и даже пирофорными /самовоспламеняющимися на воздухе/. Потухшие же и остывшие на воздухе угли /пассивированные/ могут в значительной степени терять свою химическую активность. Продукты обугливания каменного угля /кокс/ и нефти еще менее активны. Так, окисление электродного угля начинается лишь при 760°C [12]. А высокоплотные графитовые блоки устойчивы в воздушной среде до 1500°C .

Ранее мы видели, как при подкидывании деревянной дощечки на горящие угли чернеет, обугливаясь, поверхность древесины /рис.25/. Если сильно подуть на только что воспламенившуюся поверхность, то

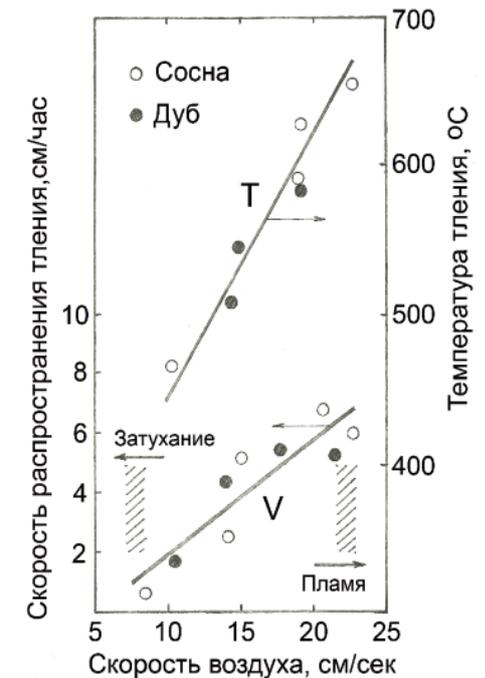
Рис.76. Температура тления в пятне T и скорость распространения фронта тления V в зависимости от линейной скорости спутного потока воздуха вдоль поверхности древесины [45].

можно легко "сдуть" пламя, обнажив слегка обугленную поверхность, причем видимых признаков остаточного тления на поверхности можно и не заметить /кроме отдельных светящихся точек/. Это объясняется тем, что в условиях интенсивного выхода летучих обугливающийся слой не нагревается от пламени выше температур порядка $250-400^\circ\text{C}$. Так что тления /как самостоятельного процесса горения/ пока не имеется.

По мере увеличения толщины обугленного слоя скорость выделения летучих сокращается, а температура поверхности угольного слоя растет до $400-600^\circ\text{C}$. Начинают проявляться локальные процессы тления угольного слоя. Причем, если "сдуть" пламя, то тление продолжается в виде пятен /зон, очагов/ тления /рис.75/.

При обдуве пятна воздушным потоком интенсивность тления повышается. Это значит, что процесс тления идет в диффузионном режиме. То есть уже при температурах порядка 400°C древесные угли /и сажа тоже/ способны выгорать со скоростями, большими, чем скорость диффузии кислорода к поверхности углей. И обдув, увеличивающий поступление кислорода, реально повышает скорость выгорания углей в пятне.

Действительно, эксперименты подтверждают, что температура тления и скорость спутного распространения пятна тления по поверхности сухой древесины быстро растет с увеличением скорости обдува воздухом /рис.76/. При скоростях обдува менее 7 см/сек тление затухало. При скоростях обдува более 22 см/сек тление раздувалось в пламя [45]. В других работах также отмечалось наличие минимально необходимых скоростей обдува для тления одиночно расположенных /то есть не в куче-костре/ образцов древесины и древесного угля [10, 46].



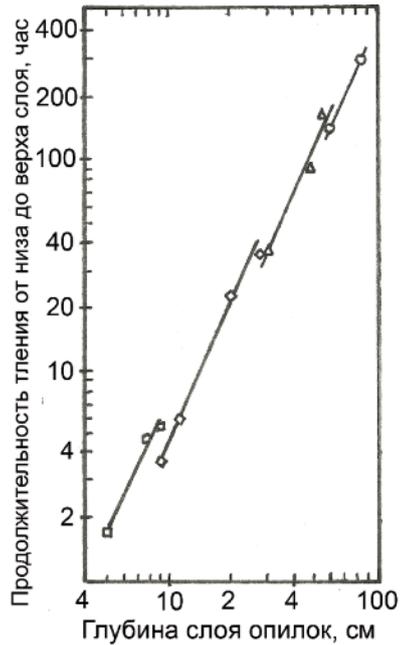


Рис.77. Время выхода тления на поверхность при разных глубинах /толщинах/ слоя сухих древесных опилок [47].

Именно этот факт и используется в так называемых "газогенераторных" печах или печах "длительного горения". При сокращении подачи воздуха в герметичную печь пламенное горение дров переходит в тление. И наоборот, подача воздуха приводит к воспламенению тлеющих дров. Режим тления считается экологически вредным из-за выделения большого количества пахучего белого дыма ρ /рис.75/.

В процессах тления целесообразно ограничивать /компенсировать/ энергетические потери на тепловое излучение, в частности, путем нагрева стенок топливника или путем образования коистра /соприкосновением тлеющих поленьев между собой/ или путем погружения тлеющих поленьев в золу. Зола хоть и

препятствует конвективному поступлению воздуха к углям, но слабо влияет на диффузию воздуха, что обеспечивает хоть и медленное, но надежное тление в золе порой даже откровенно сырой древесины.

Напомним, что присутствие в воздухе водяных паров /в том числе и из-за испарения влаги из мокрых дров/ способствует газификации углей, но требует затрат энергии и поэтому не способствует развитию самоподдерживающихся процессов тления в бытовых печах. Быстрое выгорание углей во влажном воздухе можно достичь только при пламенном горении дров /то есть при наличии мощного тепловыделения в очаге горения/.

Процессы тления можно замедлить и даже предотвратить специальной пропиткой древесины, например, солями металлов. Так, кипячение деревянной "палочки от мороженого" в концентрированном растворе поваренной соли /с последующей сушкой/ предотвращает тление угольного остова, остающегося после пламенного выгорания палочки. Так и деревянную соломку для бытовых спичек по ГОСТ1820-2001 пропитывают растворами ортофосфорной кислоты H_3PO_4 или фосфорнокислого аммония $NH_4H_2PO_4$ для предотвращения опасного остаточного тления спички. При этом выход не тлеющего угольного остатка составляет 30-35% от исходной массы спички.

Представляют интерес и экспериментальные данные по распространению очага тления из глубины слоя сухих древесных опилок вверх

навстречу диффундирующему сверху вниз воздуху /рис.77/. Оказалось, что фронт тления с глубины 1 метр достигал поверхности слоя через 400 часов /это более двух недель/. Столь большие цифры представляются неожиданными, поскольку для преодоления 10 метров понадобилось бы более 4 лет. Ясно, что причиной столь медленного распространения тления является медленность диффузии воздуха на большие глубины, в результате чего время тления росло как квадрат глубины слоя. И хотя на практике пожаров торфяных залежей и угольных отвалов реализуются, видимо, иные процессы проникновения кислорода на большие глубины /конвективные в каналах-разрежениях/, эти цифры дают понять, сколь большими могут быть периоды выхода тления из глубины слоев горючих пылевидных материалов.

Древесный уголь является высокопористым материалом, так что тление углей во многом схоже с выгоранием слоев опилок, а также с горением слоев печной сажи. Так, широко известно, что процессы выгорания осадков сажи в дымоходах /и органической пыли в вентиляционных воздуховодах/ наиболее опасны именно при наличии потоков воздуха над возгоревшимися слоями сажистых осадков. Действительно, при высоких температурах скорость химической реакции окисления углей /как и слоев сажи в дымо-

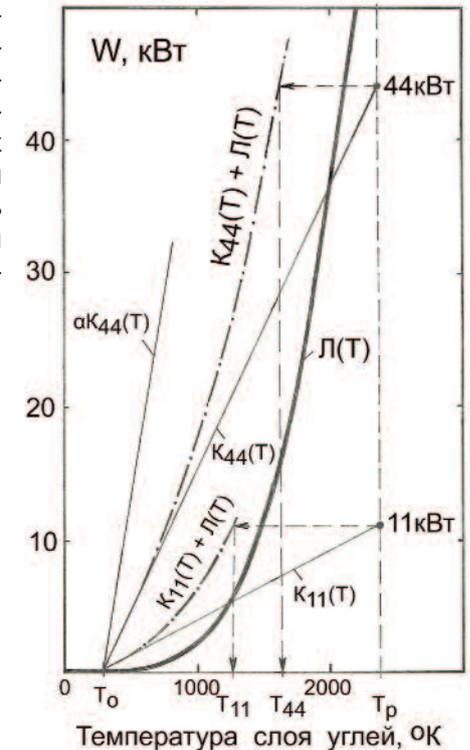


Рис.78.Графический расчет температуры горения слоя углей площадью $S=400 \text{ см}^2$. На вертикальной прямой $T_p=2373^\circ\text{K}$ откладываем точку, соответствующую мощности горения 44кВт. Соединяем ее с точкой $T_0=293^\circ\text{K}$ прямой $K_{44}(T)$, соответствующей теплосохранению дымовых газов. Суммируем $K_{44}(T)$ с $L(T)=S\sigma T^4$ и получаем штрихпунктирную кривую, затем по пунктирным стрелкам до пересечения со штрихпунктирной кривой вниз считываем температуру горящего слоя, а также лучистые потери. Аналогично для точки с мощностью горения 11 кВт.

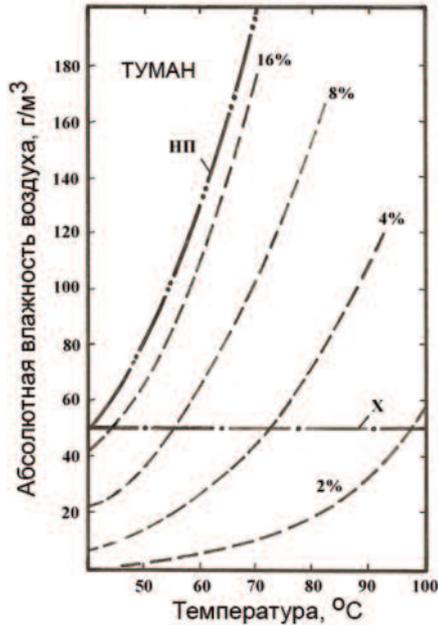


Рис.79. Температурные зависимости абсолютной влажности воздуха [51]. НП - абсолютная влажность воздуха, насыщенного паром над компактной водой /насыщенное, то есть максимально возможное, массовое содержание водяного пара в воздухе, соответствующее относительной влажности воздуха 100%/. Кривые с цифрами в процентах - абсолютные влажности воздуха над влажной древесиной /цифры - относительная влажность древесины в процентах/. X - хомотермальная кривая, отвечающая точке росы 40°C, при которой начинается конденсация влаги на теле человека.

ходах/ становится столь высокой, что обдув воздухом всегда приводит не к захлаживанию раскаленных углей, а к их большему разгоранию.

Проиллюстрируем это численно на примере дожига углей на колосниковой решетке топливника. Теплота сгорания углей QG преобразуется не только в теплосодержание раскаленных дымовых газов $K(T)$, но и в тепловое излучение $L(T)$ слоя углей $QG = K(T_p) = K(T) + L(T) = (1+11,5)C_{п.г.}G(T-T_0) + SoT^4$, где $Q = 8100$ ккал/кг - теплота сгорания углерода, G (кг/сек) - скорость выгорания углей, S (m^2) - площадь слоя углей, $C_{п.г.} = 0,32$ ккал/кг.град - средняя теплоемкость дымовых газов, T_0 , T_p и T - исходная температура воздуха, термодинамически расчетная температура продуктов сгорания и реальная температура раскаленного слоя углей в °K, $(1 + 11,5)$ в кг/кг - масса продуктов сгорания на 1 кг углей. В таком случае, при отсутствии избытка воздуха /при отсутствии "проскока" кислорода через слой углей/ при площади слоя углей $10\text{см} \times 40\text{см} = 400\text{см}^2$ и при расходе воздуха 13,8 кг/час (при скорости выгорания углей 1,2 кг/час и мощности горения 11 кВт) слой углей имеет температуру порядка 1000°C и излучает 6 кВт лучистого тепла. А при расходе воздуха 54,1 кг/час (при скорости выгорания углей 4,7 кг/час и мощности горения 44 кВт) слой углей имеет температуру 1400°C и излучает 16 кВт лучистого тепла /рис.78/.

Таким образом, при увеличении расхода воздуха /и при увеличении мощности горения/ мощность излучения слоя углей на решетке растет

количественно, но относительная доля излучения в тепловом балансе угольного слоя снижается. Аналогично, при уменьшении площади слоя углей при неизменном расходе воздуха температура слоя растет, но доля излучения падает. Поэтому, в случае отсутствия "проскока" кислорода через угольный слой для передачи как можно большего количества лучистого тепла в стенки топки выгодней делать решетку побольше, угли распределять на большую площадь, а скорость подачи воздуха делать минимально возможной.

Если же угли быстро выжигать большим потоком воздуха, как часто рекомендуется в литературе, то необходимо иметь большую теплоемкостную способность конвективной системы, чтобы тепло не вылетело в трубу. Поэтому в обычных не герметичных кирпичных печах теплом догорающих углей вообще зачастую пренебрегают, угли быстро выжигают или механически удаляют совком из топки, лишь бы только не выстудить печь /в том числе, за счет подсоса через щели и трещины кладки/ при длительном дожигании углей.

Но конечно же, конвективная подача воздуха всегда более предпочтительна для форсирования процессов тления при высоких температурах. Так принудительная подача /наддув под напором/ воздуха с высокой линейной скоростью /до десятков метров в секунду/ в слой горящих дров или углей может повысить температуру внутри тлеющего слоя /где отсутствуют лучистые потери/ до 1400°C и выше, что и используется в кузнечных горнах и заводских металлургических печах /а также в газогенератор-

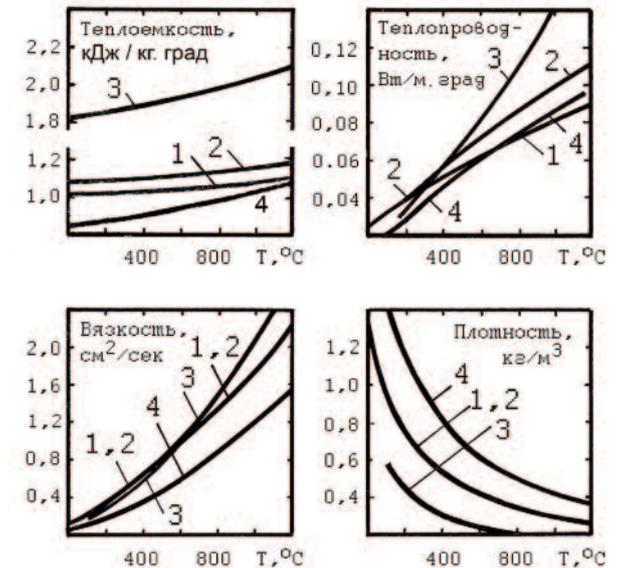


Рис.80. Температурные зависимости физических свойств газов [41]: 1 - воздух, 2 - дымовые газы "стандартного состава" (76% азот, 13% углекислый газ, 11% водяные пары), 3 - водяной пар, 4 - углекислый газ.

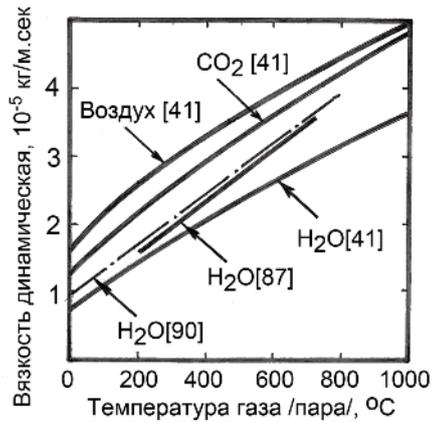


Рис.81. Температурные зависимости динамической вязкости воздуха, углекислого газа CO₂ и водяных паров H₂O.

рах/. В бытовых же печах скорости воздушных потоков за счет тяги трубы не могут превысить 4-6 м/сек, и именно такие максимальные линейные скорости стремятся использовать в кирпичных печах для быстрого дожигания углей на решетке. Так, в печном деле издавна рекомендовались большие расходы воздуха, но с малыми линейными скоростями для пламенного горения дров и малые расходы воздуха, но с большими линейными скоростями для сжигания углей на решетке [44].

1.5. Свойства воздуха как окислителя

Атмосферный воздух содержит в объемных /и массовых/ процентах: азот N₂ - 79,09%об (75,5%масс), кислород O₂ - 20,95%об (23,1%масс), аргон Ar - 0,93%об (1,29%масс), углекислый газ CO₂ - 0,03%об (0,046%масс), примеси (неона, гелия, криптона, ксенона, радона, водорода, озона, закиси азота) суммарно менее 0,0025%об, а также водяные пары H₂O сверх 100% в зависимости от влажности воздуха.

Насыщенное, то есть максимально возможное, массовое содержание водяного пара над поверхностью компактной воды в воздухе /точнее в 1 м³ пространства/ составляет: 5г/м³ (0,61%об или 611 Па,) при 0°C, 17г/м³ (2,3%об или 2338Па) при 20°C, 50г/м³ (7,1%об или 7076 Па) при 40°C /рис.7/. Реальное массовое содержание водяных паров /называемое абсолютной влажностью воздуха/ равно насыщенному массовому содержанию водяных паров в воздухе /в 1 м³ пространства/ при заданной температуре, умноженному на относительную влажность воздуха.

Давление паров воды над влажной гигроскопической древесиной /см. раздел 1.1.2/ всегда меньше, чем над поверхностью компактной /капельной/ воды /см. рис.7/. Поэтому и абсолютная влажность воздуха над древесиной уменьшается с уменьшением относительной влажности древесины /рис.79/.

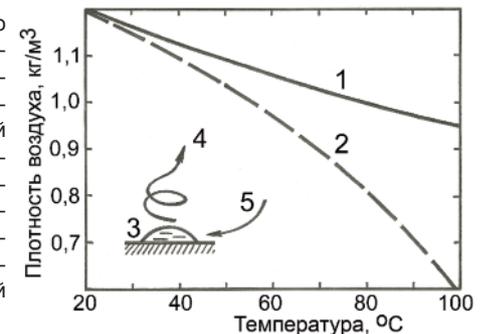
Обычно воздух в помещении имеет относительную влажность 0,4 - 0,6 /в относительных долях/ или 40-60% /в процентах/. Понятие относительной влажности воздуха практически удобно тем, что показывает степень насыщения воздуха влагой относительно максимально возможного уровня при данной температуре и подсказывает возможную эффективность сушки мокрых предметов на воздухе /то есть возможность и скорость испарения воды/. Относительная влажность также удобна тем, что легко оценивается простейшими приборами - гигрометрами по удлинению гигроскопических нитей /шерстяных, целлюлозных, в том числе и волокон древесины/.

Вместе с тем, один и тот же воздух с одним и тем же массовым содержанием водяных паров при нагреве как-бы самопроизвольно "теряет" свою относительную влажность, что иногда запутывает обывателя. Это происходит потому, что давление насыщенного пара, с учетом которого рассчитывается относительная влажность, растет с ростом температуры. Так что "потеря" воздухом своей относительной влажности в действительности лишь формальна и означает о повышении способности воздуха принять в себя дополнительные количества водяных паров при повышении температуры.

И наоборот, при охлаждении влажного воздуха относительная влажность воздуха формально растет и при некоей температуре /называемой точкой росы/ становится равной 100%, после чего избыточные количества водяных паров конденсируются либо в виде росы на поверхностях или в виде тумана /белой дымки/ в объеме воздуха.

Объемный состав воздуха, выдыхаемого человеком: азот 79,8%об, кислород 16,4% об, углекислый газ 3,8%об, водяные пары 6%об сверх 100%. Так что влага в выдыхаемом человеком воздухе способна конденсироваться даже на ладонь человека, не говоря уже о стеклах очков при комнатной температуре. Вместе с тем роса в воздухе при выдохе появляется лишь при 8-12°C /из-за быстрого разбавления выдыхаемого воздуха, а также из-за термодинамических трудностей образования первичных зародышей капель тумана/.

Рис.82. Плотность абсолютно сухого (1) и максимально увлажненного воздуха со 100%-ной относительной влажностью (2). Рисунок на графике показывает, что образующийся над каплей воды 3 легкий влажный воздух 4 всплывает вверх, а вместо него подсасывается тяжелый сухой воздух 5 (схема образования циклона над морской поверхностью). Если же влага в воздухе находится в виде тумана, то увлажненный воздух может быть тяжелее сухого.



Физические свойства воздуха при повышенных температурах приведены на рис. 80 и 81.

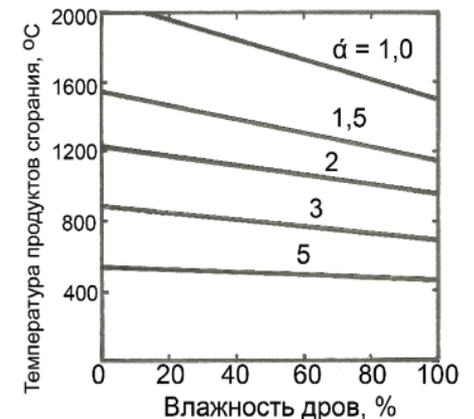
Напомним, что коэффициенты теплопроводности, вязкости и диффузии тесно связаны между собой природной сутью диффузионного процесса переноса молекул. Ведь диффузия приводит к перемещению не только молекул, но и вместе с ними импульса движения mV /в процессах вязкости/ и кинетической энергии mV^2 /в процессах кондуктивной теплопроводности/. Так, коэффициент динамической вязкости μ пропорционален коэффициенту теплопроводности λ и одновременно пропорционален произведению ρD плотности воздуха ρ на коэффициент диффузии D . Поэтому коэффициент диффузии молекул азота и кислорода в воздухе $D = 0,196 \text{ см}^2/\text{сек}$ близок к коэффициенту кинематической вязкости воздуха $\nu = \mu/\rho = 0,23 \text{ см}^2/\text{сек}$ и к коэффициенту температуропроводности воздуха $a = \lambda/C = 0,31 \text{ см}^2/\text{сек}$, где C - массовая теплоемкость воздуха. Известные расчетные температурные зависимости (λ и μ пропорциональны $T^{0,5}$, D пропорционален $T^{1,5}$) соблюдаются весьма приблизительно. Так, коэффициенты диффузии молекул в воздухе равны $D(T) = D_0(T/273)^n$, где T в $^\circ\text{K}$ [27]:

Молекула	$D_0, \text{ см}^2/\text{сек}$	n
Кислород	0,196	1,76
Водород	0,660	1,70
Вода	0,216	1,80
Окись углерода	0,149	1,72
Двуокись углерода	0,138	1,80
Бензин	0,061	2,0



Рис.83. Примерный размер частиц разной природы. Частицы с размером 10 мкм оседают /витают/ со скоростью 1 см/сек, с размером 1 мкм со скоростью 0,01 см/сек, с размером 0,1 мкм со скоростью 0,0001 см/сек. Частицы в диапазоне 1 задерживаются в верхних дыхательных путях /носоглотка, гортань, трахея/. Частицы в диапазоне 2 вдыхаются в бронхи и альвеолы легких и могут там задерживаться. Частицы в диапазоне 3 вдыхаются в альвеолы легких и затем в основном выдыхаются /но возможны химические реакции/.

Рис.84. Термодинамически расчетные температуры продуктов сгорания влажных дров при различных коэффициентах избытка воздуха α и при различных относительных влажностях дров.



С ростом температуры плотность воздуха падает /рис.80/. Поскольку водяные пары легче воздуха, то при повышенных температурах влажный воздух становится заметно легче сухого воздуха /рис.82/.

Для полного сгорания 1 кг абсолютно сухих дров теоретически необходимо затратить 4,6 нм³ абсолютно сухого воздуха /"нормальных" кубометров, то есть приведенных по объему к нормальным условиям - температуре 20 $^\circ\text{C}$ и давлению 1 атм/. При этом термодинамически расчетная температура продуктов сгорания составит 2100 $^\circ\text{C}$. Величина $\xi_{\text{сух}} = 4,6 \text{ нм}^3/\text{кг}$ (или ее соответствующий массовый эквивалент $\xi_{\text{сух}} = 6,0 \text{ кг}/\text{кг}$) называется стехиометрическим коэффициентом (стехиометрическим расходом) по воздуху для абсолютно сухой древесины. Объем продуктов сгорания при этом составит 5,3 нм³/кг [49,52].

Если в топку ввести избыточное количество воздуха /например, в три раза больше, чем необходимо для полного окисления всех компонентов древесины, то есть 13,8 нм³/кг/, то расчетная температура продуктов сгорания составит не 2100 $^\circ\text{C}$, а лишь 900 $^\circ\text{C}$, хотя термодинамически расчетная температура оболочки пламени 2100 $^\circ\text{C}$ не изменится /см. далее рис.84, 87/. Кратность избытка воздуха называется коэффициентом избытка воздуха α .

Стехиометрический коэффициент для влажной древесины $\xi_{\text{вл}}$ меньше стехиометрического коэффициента для абсолютно сухой древесины $\xi_{\text{сух}}$ в $(1 + w)$ раз, где w - относительная долевая влажность дров относительно абсолютно сухой древесины в кг/кг. Так, относительная влажность дров, соответствующая 0,3 кг воды в 1 кг абсолютно сухой древесины, равна $w = 0,3 \text{ кг}/\text{кг} = 30\%$. В частности, стехиометрический коэффициент для древесины с типичной относительной влажностью 25% составляет по объему 3,6 нм³/кг или по массе 4,8 кг/кг. Вообще говоря, требуется также поправка на влажность воздуха, поскольку воздуха с влажностью d_0 потребуется в $(1 + d_0)$ раз больше /здесь d_0 - абсолют-

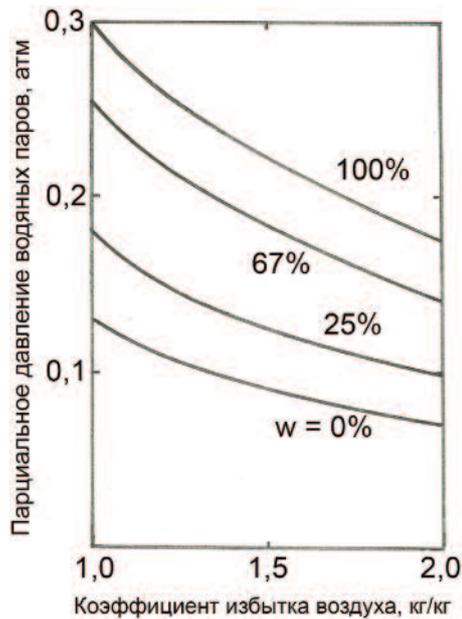


Рис.85. Расчетные парциальные давления водяных паров в дымовых газах при различных избытках воздуха и различных относительных влажностях дров w по расчетным данным [49]. Влажности дров w указаны в процентах на кривых.

ная влажность воздуха в кг воды на 1 кг абсолютно сухого воздуха/. Вышеприведенные цифры относятся к суммарному процессу сгорания дров. В реальности же сначала преимущественно сгорают летучие, а затем выгорают угли, составляющие примерно до 34% от массы исходных абсолютно сухих дров. Поэтому, из 4500 ккал/кг тепла, образующегося от сгорания 1 кг абсолютно сухих дров, не менее 1800 ккал/кг выделяется при сгорании летучих, а до 2700 ккал/кг выделяется при сгорании углей.

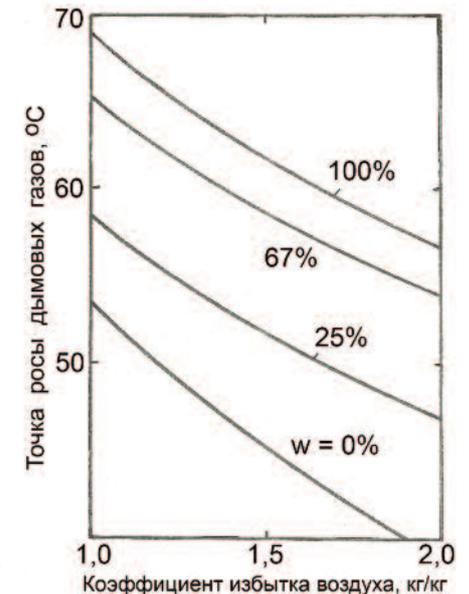
При этом из 6,0 кг/кг воздуха, потребляемого на стехиометрическое сгорание 1 кг абсолютно сухих дров, не менее 2, 1 кг/кг потребляется на сгорание летучих, а до 3,9 кг/кг потребляется на сгорание углей. При использовании влажных дров количество углей существенно уменьшается, поскольку параллельно с горением летучих происходит газификация угля с одновременным сгоранием образующихся летучих /водорода и окиси углерода, см. разделы 1.1.5 и 1.1.6/.

Теплота сгорания древесного угля составляет 8100 ккал/кг при стехиометрическом коэффициенте по воздуху 11,5 кг/кг или 8,9 $\text{нм}^3/\text{кг}$. Термодинамически расчетные температуры продуктов сгорания древесины, древесных углей и летучих примерно одинаковы и составляют ориентировочно 2100°C /для сухой древесины 1980 - 2010°C [17], для углерода 2175°C [17] и 2340°C [50] /.

1.6. Свойства дымовых газов

Дымовые газы можно формально рассматривать с известными допущениями как воздух, поступивший в печь, но видоизмененный за счет реакций горения дров, то есть обедненный кислородом, обогащенный

Рис.86. Расчетные точки росы дымовых газов при различных значениях коэффициента избытка воздуха и при различных относительных влажностях дров w по расчетным данным [49]. Влажности дров w указаны в процентах на кривых.



углекислым газом и водяными парами, а также загрязненный вредными примесями.

Наиболее характерным вредным загрязнением дымовых газов бытовых дровяных печей является визуально видимый "дым" - газозвесь /аэрозоль/ мелких твердых и жидких частиц. Процесс дымовыделения называется в зарубежной литературе эмиссией частиц веществ - "emission of particles of matters" /PM/ или "particulate matter" или "particle pollution". Обычно "тяжелые" белые /бурые/ дымы имеют размер частиц 1-10 мкм, черные дымы 0,1-1 мкм, "легкие" сизые дымки - менее 0,1 мкм /рис. 83/. Службы экологии США считают эмиссию частиц с размером менее 10 мкм /и особенно менее 2,5 мкм/ наиболее вредным компонентом дымовых газов, поскольку эти частицы способны поступать в кровь <http://www.epa.gov/pm/>.

В Европе тоже начинается ужесточение норм выброса частиц, хотя до последнего времени контролировались лишь уровни загрязнения дымовых газов окисью углерода и непредельными углеводородами "CO и CH", причем современные нормы выброса дровяных печей сопоставимы с уровнем выхлопа современных автомобилей /см. раздел 5.11/.

Основные всплески выброса дыма и окиси углерода происходят при подбрасываниях свежих дров в печь и при самопроизвольных рассыпаниях закладок поленьев во время их горения, поскольку именно в эти моменты наблюдается повышенный выход и белого, и черного дыма из-за появления в огне необугленных поверхностей древесины и из-за повышенного выхода летучих продуктов термоллиза.

В ходе горения кислород атмосферного воздуха преобразуется в двуокись углерода /без изменения объема газов/ и в водяные пары /с увеличением объемов газов/, в результате чего объем дымовых газов уве-

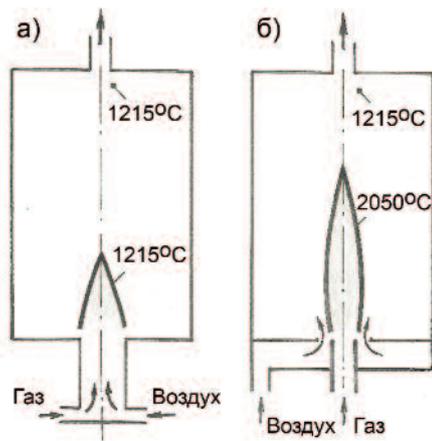


Рис.87. Температура горения кинетического пламени /то есть в случае предварительного смешения горючего газа с воздухом/ равна температуре продуктов сгорания (а). Температура горения в оболочке диффузионного факела /то есть в случае отсутствия предварительного перемешивания/ при наличии избытка воздуха значительно превышает температуру продуктов сгорания в топке (б). Указаны термодинамически расчетные температуры для горелок на природном газе и воздухе при двукратном избытке воздуха [50]. Бездымное горение диффузионной горелки при отсутствии избытка воздуха невозможно.

личивается по сравнению с объемом исходного воздуха - на 15% в случае абсолютно сухих дров и на 20% в случае дров влажностью 25% /в расчете на "нормальные" объемы - кубометры м^3 , то есть приведенные к нормальным условиям 20°C и 1 атм/. Реальный же объем /объемный расход/ горячих дымовых газов существенно превышает объем /объемный расход/ холодного исходного воздуха из-за расширения газов при повышении температуры.

Температура дымовых газов в дымовой трубе зависит не только от коэффициента избытка воздуха и влажности дров /рис. 84/. Ясно, что дымовые газы постоянно остывают в печи по мере продвижения к оголовку трубы за счет собственного излучения и за счет контактной теплопередачи /кондуктивной и конвективной/ в стенку печи. Чем ниже температура дымовых газов в дымовой трубе, тем выше КПД печи.

Дымовые газы содержат большое количество водяных паров, причем образующихся преимущественно при сгорании химических веществ древесины, а не при физической сушке исходной древесины.

Как не трудно подсчитать, массовое содержание влаги в 1 кг дымовых газов составляет $d(\text{кг}/\text{кг}) = (w + 5,96\alpha d_0 + 0,54)/(w + 5,96\alpha d_0 + 1 + 5,96\alpha) = d_0 + (0,0906 + 0,168w)/(0,168 + \alpha)$, где α - коэффициент избытка воздуха, w - относительная влажность дров в массовых долях / кг влаги на 1 кг абсолютно сухих дров/. Таким образом, влажность дымовых газов и точка росы быстро падает с ростом коэффициента избытка воздуха α /рис. 85, 86/.

Отметим попутно, что газы обладают способностью растворяться в воде, в том числе и каплях тумана. Если растворимости азота $0,015 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и кислорода $0,031 \text{ м}^3/\text{м}^3$ не велики, то растворимости углекислого газа $0,88 \text{ м}^3/\text{м}^3$, сернистого газа $39 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и хлористого водорода $440 \text{ м}^3/\text{м}^3$ значительны /все численные данные для 20°C /. Поэтому, например, присутствие серы в топливе /в угле или в природном газе/ приводит к переводу капель водяного тумана в капли серной кислоты, причем точка росы при этом заметно повышается, поскольку в дымовых трубах конденсируется уже не вода, а серная кислота. Все это может привести к дополнительному разрушению стенок дымовых труб.

В заключение еще раз подчеркнем, что в случае горения дров температура дымовых газов не имеет никакого отношения к температуре горения /см. раздел 1.3.3/. Просто иногда ошибочно называют температуру дымовых газов в дровяной топке температурой горения печи. В действительности же, температура горения в оболочке диффузионного факела равна термодинамически расчетной температуре для коэффициента избытка воздуха, равного единице /с учетом потерь на излучение реальная температура горения намного ниже/. А потом получившиеся горячие продукты горения смешиваются с избыточным количеством воздуха /"балластом"/, охлаждаются за счет смешения и приобретают температуру дымовых газов, равную термодинамически расчетной температуре при реальном избытке воздуха /рис. 87/. И только в пламенах с предварительным смешением газов с воздухом /в кинетических пламенах/ температура горения равна температуре дымовых газов.