

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Учебное пособие

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2021

УДК (669.04+621.7):621.43.016

ББК 31.31

М54

А в т о р ы :

В. И. Лукьяненко, Г. Н. Мартыненко, А. В. Исанова,

В. В. Черниченко

Р е ц е н з е н т ы :

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
атомных электрических станций Международного института
компьютерных технологий *Щитов В. В.*;

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
теоретической и промышленной теплоэнергетики Воронежского
государственного технического университета *Барakov А. В.*

М54 **Металлургическая теплотехника** : учебное пособие /
[В. И. Лукьяненко и др.]. – Москва ; Вологда : Инфра-
Инженерия, 2021. – 200 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0626-0

Рассмотрены состав топлива и процессы, протекающие при его горении. Показано основное и вспомогательное оборудование металлургических производств, литейных и термических цехов машиностроительных заводов. Раскрыты методы утилизации теплоты и очистки дымовых газов, описано соответствующее оборудование.

Для студентов металлургических и машиностроительных направлений подготовки.

УДК (669.04+621.7):621.43.016

ББК 31.31

ISBN 978-5-9729-0626-0

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

© Оформление.

Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

◀ ВВЕДЕНИЕ ▶

Производство чёрных и цветных металлов, лежащее в основе развития современной техники, связано с протеканием высокотемпературных, весьма энергоёмких процессов.

Развитие металлургии, а также различных ее переделов всегда сопряжено с совершенствованием существующих или внедрением новых теплотехнических процессов.

При выплавке чугуна в объёме доменной печи протекают сложнейшие теплофизические процессы. К ним относятся гидродинамические и тепломассообменные процессы в слое, горение кокса и др. Совершенствование работы доменных печей всегда связано с воздействием на протекание теплофизических процессов.

Рассмотрение условий развития процессов производства стали в конвертерах, мартеновских и электропечах убеждает, что и в этом переделе важную роль играют теплофизические процессы.

Кислородно-конвертерный процесс основан на взаимодействии кислородной струи с расплавленным металлом — сложнейшем теплофизическом процессе, определяющем гидродинамику и тепломассоперенос в ванне расплавленного металла. Повышение производительности и качества работы мартеновских печей всегда связано с интенсификацией гидродинамических и тепломассообменных процессов.

В электросталеплавильных печах гидродинамические и тепломассообменные процессы также являются основными.

Важнейшая роль принадлежит теплотехническим процессам и в производстве и термической обработке проката. Качественный нагрев металла перед обработкой давлением — совершенно необходимое условие для нормальной работы прокатного и кузнечного оборудования. Термическая обработка прокатной продукции основана на соответствующих тепломассообменных процессах, осуществляемых в печах специального назначения.

Немало подобных примеров, подтверждающих положение о том, что теплофизические процессы — стержень современной металлургии, можно было бы привести и из практики работы заводов цветной металлургии и машиностроения.

В современном понимании печь — это тепловой агрегат, в котором происходит получение теплоты из того или иного вида энергии и передача ее материалу, подвергаемому обработке.

Подавляющее большинство процессов, протекающих в печах, совершается при высоких температурах и связано с большими затратами тепловой энергии. Высокая энергоёмкость печных процессов делает металлургическую теплотехнику ответственной за энергетические показатели работы печей, на долю которых приходится очень большая часть всей энергии, расходуемой как в нашей стране, так и в мире в целом. Поэтому сфера приложения металлургической теплотехники как науки включает в себя не только теплофизические процессы, лежащие в основе работы металлургических печных агрегатов, но и важнейшие вопросы, сопутствующие работе этих агрегатов, такие как использование вторичных энергоресурсов, охрана окружающей среды и др.

Благодаря своей роли в современном производстве, металлургическая теплотехника уже давно выделилась в самостоятельный раздел технической физики, широко

использующий такие ее составные части, как теория горения, гидро- и аэродинамика, тепло- и массоперенос в твердых, жидких и газообразных средах.

В развитие металлургической теплотехники большой вклад внесли русские и советские ученые. Известный русский металлург-теплотехник В. Е. Грум-Гржимайло в 1905–1906 гг. впервые сформулировал основные положения гидравлической теории печей. И хотя в настоящее время многие положения этой теории утратили свое значение, появление ее было прогрессивным явлением, способствующим развитию металлургической теплотехники как в нашей стране, так и за рубежом. Устарели также положения так называемой энергетической теории, в соответствии с которой работа печи рассматривалась зависящей в основном от ее тепловой мощности. Последние десятилетия развитие печей идет по пути создания высокопроизводительных механизированных и автоматизированных печных агрегатов, интенсификация работы которых обеспечивается соответствующим развитием тепломассообменных процессов, протекающих в рабочем пространстве печей.

Многие годы над созданием общей теории печей работал М. А. Глишков, который в 1959 году сформулировал основные положения этой теории, разработанные на основе глубокого анализа энергетических процессов, протекающих в печах. М. А. Глишков доказал, что основными процессами в печах являются процессы теплоотдачи обрабатываемому материалу. Было показано, что процессы теплогенерации, движения газов, конструктивные особенности рабочего пространства печей должны быть подобраны таким образом, чтобы достигался наивысший (необходимый) уровень теплоотдачи к обрабатываемому материалу.

Тепломассообменные процессы, протекающие в рабочем пространстве печей, сложны и многообразны, анализ

их выполняется с использованием самого современного математического аппарата, позволяющего создавать и полезно использовать математические модели. Математические модели в металлургической теплотехнике используются с каждым годом все шире и шире. В промышленных печах физический эксперимент часто или затруднен или вообще невозможен, поэтому в этих условиях математическое моделирование оказывается очень плодотворным.

Многие современные печные агрегаты, будучи высококомеханизированными, представляют собой по существу тепловые машины, которые при наличии адаптированных математических моделей могут быть переведены на автоматизированные системы управления с использованием ЭВМ. Уже сейчас немало таких примеров, и число их непрерывно увеличивается.

Пути развития металлургической теплотехники достаточно многообразны. Развитие теоретических основ определяется необходимостью выделения, в соответствии с теорией М. А. Глинкова, главных теплофизических процессов в рабочем пространстве конкретных печных агрегатов, составления соответствующих этим процессам математических моделей с последующим их использованием для совершенствования печей и создания автоматических систем управления ими.

В практическом плане совершенствование конструкций печных агрегатов и методов их эксплуатации должно происходить в направлении создания высокопроизводительных агрегатов, отвечающих требованиям современного поточного производства с непрерывным снижением энергоемкости процессов плавления и нагрева, осуществляемых в этих агрегатах.

◀ ГЛАВА 1 ▶

ВИД, СОСТАВ И РАСЧЁТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

1.1. Вид и состав топлива

Топливо — горючее вещество, выделяющее при сгорании значительное количество теплоты и используемое как источник получения энергии.

Топливо по агрегатному состоянию подразделяют на твердое, жидкое и газообразное. Оно может быть естественным — используемым в том состоянии, в каком оно находится в природе, и искусственным — переработанным из естественных видов топлива.

К твердому естественному топливу, сжигаемому в различных печах, относят дрова, торф, антрацит, бурые и каменные угли. К твердому искусственному топливу — древесный уголь, кокс, термоантрацит, брикеты и пыль из бурого и каменного углей. В качестве жидкого искусственного топлива используют мазут и различные смолы. Газообразное топливо может быть естественным (природный газ) и искусственным — газы, получаемые в доменных печах (доменный или колошниковый), в коксовых печах (коксовый) и в газогенераторах (генераторный).

Для отопления кузнечных, прокатных и термических печей используют только газообразные и жидкие топлива.

1.1.1. Состав жидкого топлива

Все жидкие топлива представляют собой вещества органического происхождения. Основные составляющие элементы — углерод, водород, кислород, азот и сера, которые образуют многочисленные сложные химические соединения.

Углерод (С) — основной носитель теплоты: при сгорании 1 кг углерода выделяется 34 000 кДж теплоты. В мазуте может содержаться до 85 % углерода, образующего соединения.

Водород (Н) — второй наиболее важный элемент топлива: при сгорании 1 кг водорода выделяется около 125 000 кДж теплоты, т. е. почти в 4 раза больше, чем при горении углерода. В жидких топливах содержится 10 % водорода.

Азот (N) и кислород (O) содержатся в топливе в небольших количествах (около 3 %), входят в состав сложных органических кислот и фенолов.

Сера (S) обычно входит в состав углеводородов (до 4 % и более). При сгорании выделяется большое количество теплоты, однако сернистые соединения взаимодействуют с расплавленными или нагреваемыми металлами и ухудшают их качество. Сталь, насыщенная серой, обладает повышенной красноломкостью. Продукты горения, содержащие сернистые соединения, повышают коррозию металлических деталей печей. В состав жидкого топлива входят также влага (W) и до 0,5 % золы (A).

Влага и зола уменьшают процентное содержание горючих составляющих топлива, что снижает его ценность.

Состав топлива определяют техническим и элементарным анализами. Технический анализ проводят в заводских условиях, а элементарный — в специальных химических лабораториях.

При техническом анализе определяют процентное содержание влаги, золы и серы в топливе. Состав органической массы топлива в основном устойчивый, поэтому тщательный контроль за элементарным составом необязателен. Для производственных целей определяют теплоту сгорания топлива и его свойства: вязкость, температуру застывания, температуру вспышки и др.

При элементарном анализе, который проводится после технического, определяют содержание углерода, водорода, кислорода и серы в топливе. Эти элементы, взаимодействуя, образуют сложные соединения, многие из которых еще мало изучены. Поэтому условно принимается такой элементарный состав топлива, при котором каждый элемент (С, Н, О, N, S) или балластные составляющие (влага W и зола A) считаются свободными, не связанными в соединения.

Принято считать, что углерод, водород, кислород и азот образуют главную часть топлива, которая называется органической массой (о):

$$C^o + H^o + O^o + N^o = 100 \%$$

Органическую массу топлива, содержащую серу, называют горючей массой (г):

$$C^g + H^g + O^g + N^g = 100 \%$$

Высушенное топливо не имеет влаги. Состав сухой массы (с):

$$C^c + H^c + O^c + N^c = 100 \%$$

Топливо, содержащее все составляющие, называют рабочим.

Состав рабочего топлива:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100 \%$$

В справочниках часто приводят составы сухой или органической массы, вследствие чего возникает необходимость в пересчете состава на рабочую массу. Например, при пересчете с горючей и органической массы на рабочую уравнения для определения содержания углерода имеют вид:

$$C^P = C^r (100 - W^P - A^P) / 100 ;$$

$$C^P = C^o (100 - W^P - A^P - S^P) / 100 .$$

Аналогичным образом можно пересчитать и содержание остальных составляющих топлива. Видно, что при пересчете на рабочую массу уменьшается содержание всех составляющих. Наоборот, при пересчете на горючую или органическую массу содержание составляющих топлива увеличивается. Например,

$$C^r = 100C^P / (100 - W^P - A^P) ;$$

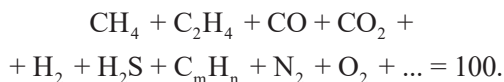
$$C^o = 100C^P / (100 - W^P - A^P - S^P) .$$

1.1.2. Состав газообразного топлива

Газообразное топливо — смесь различных газов: метана, этилена и других углеводородов, оксида углерода, двуоксида углерода или углекислого газа, азота, водорода, сероводорода, кислорода и других газов, а также водяных паров.

Состав газообразного топлива определяют с помощью приборов, называемых газоанализаторами.

Состав сухого топлива:



Метан CH_4 — основная составляющая часть многих природных газов. Метана в природных газах может содержаться до 93–98 %. При сгорании 1 м^3 метана выделяется 35 800 кДж теплоты.

В газах может содержаться небольшое количество этилена C_2H_4 . При сгорании 1 м^3 этилена выделяется 59 000 кДж теплоты.

В газообразном топливе помимо метана и этилена содержатся более сложные углеводородные соединения, например пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} и др. При горении этих углеводородов выделяется большее количество теплоты, чем при сгорании этилена, но в горючих газах их содержание незначительно.

Водород H_2 в 14,5 раза легче воздуха. При сгорании 1 м^3 водорода выделяется 10 800 кДж теплоты. Многие горючие газы, кроме коксового, содержат относительно небольшое количество водорода. В коксовом газе может содержаться 50–60 % H_2 .

Оксид углерода (CO) — основная горючая составляющая доменного газа. При сгорании 1 м^3 этого газа выделяется 12 770 кДж теплоты. Этот газ не имеет ни цвета, ни запаха, очень ядовит.

Сероводород (H_2S) — тяжелый газ с неприятным запахом, обладает высокой токсичностью. При наличии в газе сероводорода повышается коррозия металлических частей печи и газопровода. Корродирующее воздействие сероводорода усиливается при одновременном присутствии в газе кислорода и влаги. При горении 1 м^3 сероводорода выделяется 23 400 кДж теплоты.

Остальные газы (CO_2 , N_2 , O_2) и пары воды — балластные составляющие. При повышении содержания этих газов снижается содержание горючих составляющих. Их присутствие в топливе приводит к понижению температуры горения топлива. Содержание в топливе более 0,5 %

свободного кислорода считается опасным по условиям техники безопасности.

Состав влажного газообразного топлива:

$$\text{CO}^{\text{B}} + \text{CO}_2^{\text{B}} + \text{H}_2 + \text{C}_m \text{H}_n^{\text{B}} + \text{N}_2^{\text{B}} + \text{O}_2^{\text{B}} + \dots \text{H}_2\text{O} = 100,$$

где C_mH_n — содержание углеводородов в топливе, %.

Количество пыли, сажи, смол, а иногда и влаги, содержащихся в газах, обычно выражают в $\text{г}/\text{м}^3$ и обозначают g .

Объём водяного пара в газе, %:

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{100g}{(803,6 + g)}.$$

По известному объёму водяных паров можно вычислить состав влажного газа:

$$\text{X}^{\text{B}} = kX,$$

где X^{B} и X — содержание какой-либо составляющей, например метана, во влажном и сухом газах;

k — поправочный коэффициент:

$$k = \frac{(100 - \text{H}_2\text{O})}{100}.$$

1.2. Теплота сгорания топлива

Теплотой называют то количество теплоты Q , кДж, которое выделяется при полном сгорании 1 кг жидкого или 1 м^3 газообразного топлива.

В зависимости от агрегатного состояния влаги в продуктах сгорания различают высшую и низшую теплоту сгорания. Если в продуктах сгорания влага находится в жидком виде, то теплота сгорания будет высшей — $Q_{\text{В}}$;

при парообразном состоянии влаги теплота сгорания будет низшей — Q_n .

Влага в продуктах сгорания жидкого топлива образуется при горении водорода H^p , а также при испарении начальной влаги топлива W^p . В продукты сгорания попадает также и влага воздуха, использованного для горения. Однако ее обычно не учитывают. При содержании в топливе H^p кг водорода при горении образуется $9 H^p$ кг влаги. При этом в продуктах сгорания содержится $(9 H^p + W^p)$ кг влаги. На превращение 1 кг влаги в парообразное состояние затрачивается ~ 2500 кДж теплоты. Если конденсация паров воды не произойдет, то теплота, затраченная на испарение влаги, не будет использована. В этом случае получим низшую теплоту сгорания. Обычно в печах температура газов значительно выше температуры конденсации водяных паров. Поэтому основной характеристикой топлива будет низшая теплота сгорания.

Теплота сгорания (в кДж) может быть отнесена к любой массе топлива, но чаще всего ее относят к рабочей массе. Можно записать, что

$$Q_n^p = Q_b^p - 25 (H^p + W^p).$$

В этой формуле содержание H^p и W^p выражено в процентах, поэтому сомножитель перед скобками уменьшен в 100 раз. Аналогичным образом можно выразить разницу между высшей и низшей теплотой сгорания газообразного топлива. Существует два метода определения теплоты сгорания: экспериментальный и расчётный.

При экспериментальном определении теплоты сгорания навеску топлива сжигают в приборах, называемых калориметрами. Теплота, выделяющаяся при горении топлива, поглощается водой. Зная массу воды, по изменению ее температуры можно вычислить теплоту сгорания. Досто-

инство метода — его простота. Для определения теплоты сгорания по этому методу достаточно иметь данные технического анализа.

При использовании расчётного, более быстрого метода теплоту сгорания определяют по формулам, но для этого нужны данные элементарного анализа. Существует большое число формул, но для жидкого и твердого топлива чаще используют формулу Д. И. Менделеева:

$$Q_{\text{н}}^{\text{P}} = 339C^{\text{P}} + 1030H^{\text{P}} - 109(O^{\text{P}} - S^{\text{P}}) - 25W^{\text{P}} \text{ кДж/кг},$$

где C^{P} , H^{P} , O^{P} , S^{P} , W^{P} — соответственно содержание углерода, водорода, кислорода, серы и влаги в рабочем топливе, %.

Формула учитывает тот факт, что небольшая часть углерода и водорода находится в топливе в соединении с другими элементами, образуя негорючие соединения.

Формула для определения теплоты сгорания газообразного топлива построена по такому же простому принципу, что и формула Д. И. Менделеева. Ею суммируются количества теплоты, выделяющейся при горении отдельных составляющих топлива. Естественно, что количество выделившейся теплоты зависит не только от величины теплового эффекта реакции горения того или иного компонента, но и от его количества в топливе. Поэтому в правой части формулы находятся члены, представляющие собой произведение теплового эффекта реакции горения на содержание газа в топливе в процентах.

Для газообразного топлива теплота сгорания, кДж/м³:

$$\begin{aligned} Q_{\text{н}}^{\text{P}} = & 127CO + 108H_2 + 358CH_4 + 590C_{\text{m}}H_{\text{n}} + \\ & + 560C_2H_2 + 636C_2H_6 + 913C_3H_8 + 1185C_4H_{10} + \\ & + 1465C_5H_{12} + 234H_2S. \end{aligned}$$

Если в природном газе содержится до 3 % C_mH_n (непредельных углеводородов неизвестного состава), то их можно принять за этилен C_2H_4 . Поэтому в формулу будет входить слагаемое $590 C_mH_n$. В коксовом газе состав непредельных углеводородов сложнее. Они имеют повышенную теплоту сгорания. Поэтому при их содержании до 3 % в формулу вводят слагаемое $710 C_mH_n$.

Значение теплоты сгорания газа, вычисленное по формуле, немного меньше значения, определенного с помощью калориметра. При вычислениях по формуле не учитывается наличие в газах смол и паров жидких углеводородов. Различные топлива имеют различную теплоту сгорания. Для нормирования и учета расхода топлива используют понятие условного топлива.

Условным принято называть топливо с низшей теплотой сгорания ($29\,310$ кДж/кг). Для перевода любого топлива в условное следует разделить его теплоту сгорания на $29\,310$ кДж/кг, т. е. найти эквивалент данного топлива: для мазута он равен $1,37-1,43$, для природных газов — $1,2-1,4$.

1.3. Топливо для печей

1.3.1. Мазут

Для отопления печей используют мазут, являющийся продуктом переработки нефти. Средний состав мазута: $85-80\%$ C^r ; $10-12,5\%$ H^r ; $0,5-1,0\%$ ($O^r + N^r$); $0,4-2,5\%$ S^r ; $0,1-0,2\%$ A^p ; 2% W^p . Теплота сгорания мазута равна $39-42$ МДж/кг. В зависимости от процентного содержания серы мазут подразделяют на малосернистый ($< 0,5\%$ S^r), сернистый ($0,5-1\%$ S^r) и высокосернистый ($> 1\%$ S^r). Содержание влаги в мазуте, отправляемом с нефтеперерабатывающего завода, не должно превышать 2% .

Мазут подразделяют также по содержанию парафина и способу переработки нефти. Различают мазут прямой перегонки (маловязкий) и крекинг-мазут, обладающий повышенной вязкостью. В зависимости от вязкости мазут классифицируют по маркам. Номер марки мазута показывает условную вязкость при температуре 50 °С ($V_{У50}$). Вязкость определяют с помощью приборов — вискозиметров. За условную вязкость принимают отношение времени истечения 200 см³ нефтепродукта при температуре испытания ко времени истечения такого же объёма воды, имеющей температуру 20 °С, по этому показателю мазут делят на марки: 40, 100, 200 и МП (мазут для мартеновских печей).

С увеличением номера марки мазута увеличивается его плотность, которая составляет 0,95–1,05 г/см³ при 20 °С; с повышением температуры плотность уменьшается.

Рассмотрим некоторые свойства мазута. Плотность мазута влияет на способ подготовки его к сжиганию, заключающийся в отстое и фильтрации мазута для отделения воды и механических примесей (песка, глины и т. д.). Мазут отделяют от воды при повышенной температуре, выбор которой зависит от его марки и плотности. Вязкость и плотность мазута при нагреве уменьшаются, вследствие чего он всплывает вверх. Внизу емкости скапливается влага, сверху — обезвоженный мазут.

Вязкость мазута имеет большое значение при его сливе из железнодорожных цистерн, при подаче по трубопроводам из заводских и цеховых емкостей к печам, а также при распыливании форсунками. Мазут обычно сжигают в распыленном состоянии с помощью форсунок.

На перекачку и распыление мазута затрачивается тем меньше энергии, чем ниже его вязкость, зависящая от температуры; чем выше температура, тем ниже вязкость. Температуру выбирают по графикам вязкости, исходя из

обеспечения условной вязкости мазута 5–10 ед. Недогрев вязкого мазута затрудняет его использование, а перегрев сильно обводненного мазута вызывает его вспенивание, что опасно с точки зрения техники безопасности и может привести к пульсирующему горению.

При разогреве надо учитывать температуру вспышки мазута, т. е. температуру нагрева, при достижении которой начинается интенсивное выделение летучих составляющих, способных загораться от искры или пламени. Она обычно изменяется в пределах 80–190°.

Температуру вспышки следует отличать от температуры воспламенения, под которой понимают температуру нагрева, при достижении которой (500 °С) мазут самопроизвольно воспламеняется и при благоприятных условиях продолжает гореть.

1.3.2. Газообразное топливо

Это топливо обладает многими преимуществами по сравнению с жидким топливом. Подогревая газ и воздух, идущие на горение, можно получить высокую температуру горения. Процесс сжигания газа легко автоматизируется. При использовании газообразного топлива облегчается управление составом печной атмосферы, улучшаются санитарно-гигиенические условия работы обслуживающего персонала. Однако при этом повышаются требования техники безопасности. Печи отапливают природным газом и газом, получаемым при добыче и переработке нефти. Кроме того, печи металлургических заводов отапливают доменным и коксовым газами и их смесями.

Природный газ добывают из чисто газовых месторождений или вместе с нефтью (попутный газ). В первом случае основной горючей составляющей является метан, содержание которого может достигать до 95–98 %. Попутные

газы помимо метана содержат значительные количества других углеводородов: этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} , пентан C_5H_{12} и др. Попутные газы имеют высокую теплоту сгорания, но в качестве топлива их используют редко. Их применяют в основном в химической промышленности.

Природный газ, добываемый из газовых месторождений, — самое дешевое топливо.

1.4. Основные положения теории горения

Горением называют процесс быстрого химического соединения горючих элементов топлива с окислителем, обычно с кислородом воздуха, сопровождающийся выделением теплоты и света.

Непосредственно перед горением требуется обеспечить хорошее перемешивание между молекулами горючих веществ топлива с окислителем. Затем полученную смесь необходимо нагреть до температуры воспламенения. Выделяемая при горении теплота расходуется на нагрев новых порций топлива и воздуха, вступающих в реакцию, на нагрев образующихся при этом продуктов сгорания и на компенсацию потерь теплоты в окружающую среду.

Температура воспламенения мазута 530–600 и газов 500–700 °С. При достижении температуры воспламенения реакции окисления резко ускоряются, и процесс переходит непосредственно в горение. При отоплении печей обычно используют факельный метод сжигания топлива. Факел — частный вид пламени, образующегося при подаче топлива и воздуха в печь струями. В факеле происходят одновременно процессы перемешивания, подогрева смеси до температуры воспламенения и собственно горения. Факел имеет вполне определенную форму и размеры.

В теории горения различают гомогенное и гетерогенное горение. Гомогенное горение происходит в объеме, а гетерогенное — на поверхности капелек, а затем, после испарения летучих составляющих, на сажистых частицах. Чем меньше размер частиц жидкого топлива, тем больше будет удельная поверхность взаимодействия твердой фазы с газовой. Поэтому распыливание жидкого топлива позволяет сжечь больше топлива в единице объема, т. е. интенсифицировать горение.

Гомогенное горение может происходить в двух режимах: кинетическом и диффузионном. В первом случае в зону горения, например в рабочее пространство печи, подают заранее подготовленную топливно-воздушную смесь. Основной этап процесса — прогрев смеси и окисление горючих составляющих топлива. При этом факел получается короткий и высокотемпературный. Предварительный подогрев смеси или обогащение воздуха кислородом ускоряет процесс горения. Так, подогрев многих газоздушных смесей до 500 °С приводит к увеличению скорости горения почти в 10 раз. Температура предварительного подогрева смеси не должна превышать температуры ее воспламенения, чтобы избежать горения внутри горелки. Во втором случае процессы смешения, подогрева смеси и горения осуществляются в факеле одновременно. Наиболее медленная стадия — смесеобразование, т. е. встречная диффузия молекул и микро- и макрообъемов газа и воздуха. Поэтому факел будет длиннее, чем в первом случае. Желая сократить длину факела, газовый и воздушный поток дробят на отдельные струйки. Этому же способствует увеличение скоростей струй и направление потоков газа и воздуха под углом друг к другу и т. д. Улучшения перемешивания газа с воздухом добиваются с помощью выбора более совершенной горелки, подогрева газа, воздуха и т. д.