

# Теплоэнергетика: состав и основные характеристики твердых топлив, процессы горения, организация сжигания топлив

(факультативно)

доц. Прокопенко А.В.

<http://accel.ru>

27.04.2020

# Топливо и его виды

«Топливом называется горючее вещество, умышленно сжигаемое для получения теплоты» Д.И. Менделеев

Топливо – химическое вещество, способное при горении (окислении) выделять значительное количество теплоты.

## Классификация топлив

по методу получения: **ископаемые и искусственные**

по агрегатному состоянию:

**твердое:** антрацит, каменный и бурый уголь, торф, древесина, сланцы, отходы деревообработки, сельхоз отходы;

**жидкое:** нефть и продукты ее переработки (бензин, керосин, лигроин, масла, дизельное топливо, мазут);

**газообразное:** природный газ, попутный нефтяной газ, коксовый и доменный газ, крекингový газ, генераторный газ

## Состав топлив

Топливо сжигаемое в технических устройствах н-ся **рабочим топливом**.

В состав рабочего топлив входят: углерод **C**, водород **H**, кислород **O**, азот **N** и летучая сера **S**, а также негорючие минеральные примеси – зола **A** и влага **W**.

Элементный состав рабочего топлива:

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

где  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $O^p$  – элементы рабочего топлива в процентах от общей массы.

**Балласт топлива это влага  $W$  и зола  $A$ .** Балласт снижает теплоту сгорания топлива и затрудняет процесс горения в топке.

**Сера  $S$**  в естественных видах твердых топлив бывает **трех видов**:

- *органическая  $S^o$* , связанная с другими элементами топлива (C, H, N, O);
- *колчеданная  $S^k$*  в виде пирита, колчедана  $FeS_2$ ;
- *сульфатная  $S^{сульф}$*  в виде солей серной кислоты (гипс,  $FeSO_4$  и др.)

Сера, содержащаяся в сульфатах, не горит и относится к балласту. Органическая и колчеданная сера образуют летучую горючую серу  $S_n$  (при горении образует токсичный сернистый ангидрид  $SO_2$ )

Содержание **N** составляет 1-2 % по массе и при сгорании в высокотемпературных топках (1200 °C) образуются высокотоксичные оксиды **NO**, и **NO<sub>2</sub>**.

## Сухая и горючая масса топлива

**Летучие вещества** – газы, водяные и смоляные пары, образующиеся в результате разложения органической массы твердого топлива при нагревании без доступа воздуха (С и Н). **Выход летучих веществ**  $V^r$  в % на горючую массу, определяют путем прокаливания 1 г топлива в закрытом тигле при температуре  $(850 \pm 10)^\circ\text{C}$  в течение 7 мин.

Элементный состав топлива удобнее выражать через характеристики *сухая масса* и *горючая масса* топлива.

**Сухая масса** топлива:

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

где  $C^c$ ,  $H^c$ ,  $O^c$  и т.д. – элементы рабочего топлива в процентах от сухой массы топлива.

**Горючей массы** топлива (без золы и влаги):

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r_{\text{л}} = 100\%$$

где  $C^c$ ,  $H^c$ ,  $O^c$  и т.д. – элементы рабочего топлива в процентах от сухой массы топлива.

**Зольность** — количество **зола** (твердый негорючий остаток), образующийся после полного сгорания топлива и определяемое в процентах к общему его весу до сжигания.

Зола может быть в виде *сыпучей массы* плотностью  $600 \text{ кг/м}^3$  и *шлака* (сплавленных кусков) —  $800 \text{ кг/м}^3$ . Процесс отделения золы называется **обогащением** топлива.

В состав золы входят: глинозем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , кремниевая кислота  $\text{SiO}_2$ , известь  $\text{CaO}$ , магнезия  $\text{MgO}$ , щелочи  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ , окислы железа  $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

**Влажность** — количество воды, присутствующее в **топливе**, и выраженное в процентах от массы **топлива**.

Влага бывает *внешняя* (капиллярная) и *внутренняя* (гигроскопическая и коллоидная). Для твердых топлив используют **приведенную влажность** (% ,  $\text{кг/МДж}$ ), отнесенную к  $Q^p_n$  — низшей рабочей теплоте сгорания топлива [ $\text{МДж/кг}$ ]:

$$W^п = 1000W^р / Q^p_n$$

Влажность определяют высушиванием навески при  $105 \dots 110 \text{ }^\circ\text{C}$ . Если  $W^п < 3\%$  — топливо маловлажное,  $W^п = 3,89 \dots 8 \%$  — топливо высоковлажное.

# Теплота сгорания топлива

**Теплота сгорания  $Q$**  – количество теплоты, выделяемое 1 кг (1 м<sup>3</sup> при 0 °С и 760 мм рт.) при сгорании топлива при его полном сгорании – [кДж/кг] ([кДж/м<sup>3</sup>]).

**Высшая теплота сгорания** рабочего топлива  $Q^p_v$  – теплота, выделяемая при полном сгорании 1 кг топлива, считая, что образующиеся при сгорании водяные пары конденсируются. (антрацит  $Q_{\max} > 35$  МДж/кг)

**Низшая теплота сгорания** рабочего топлива  $Q^p_n$  – теплота, выделяемая при полном сгорании 1 кг топлива, за вычетом теплоты, затраченной на испарение как влаги, содержащейся в топливе, так и влаги, образующейся от сгорания водорода.

Теплоту сгорания определяют *калориметрическим и аналитическим методами.*

***Условное топливо 29,35 МДж/кг (7000 ккал/кг) малозольный сухой уголь***

***для твердых и жидких топлив формула Д.И. Менделеева [МДж/кг]***

$$Q^p_n = 0,34 C^p + 1,03 H^p - 0,11 (O^p - S^p_{л}) - 0,025 W^p$$

***для сухого газообразного топлив [кДж/м<sup>3</sup>]:***

$$Q^c_n = 127 CO + 108 H_2 + 358 CH_4 + 591 C_2H_4 + 638 C_2H_6 + 911 C_3H_8 + 234 H_2S$$

# Твердое топливо

В твердом топливе горючими элементами являются только углерод С, водород Н и сера S. Углерод С – преобладающий компонент твердых и жидких топлив, его содержание – от 50 до 95%; содержание водорода Н<sup>г</sup> – от 1 до 11%; содержание серы S<sup>г</sup> – от 0 до 8%. Содержание азота N<sup>г</sup> в горючей массе – 1 ... 2 %.

Топливо	Состав горючей массы, %					Выход летучих V <sup>г</sup> , %	Низшая теплота сгорания МДж/кг	Жаропр оизводи- тельность t <sub>max</sub> , °C	Сумма газов RO <sub>2</sub> max, %
	C <sup>г</sup>	S <sup>г</sup>	H <sup>г</sup>	O <sup>г</sup>	N <sup>г</sup>				
Дрова	51	–	6,1	42,3	0,6	85	19	1980	20,5
Торф	58	0,3	6	33,6	2,5	70	8,12	2050	19,5
Горючий сланец	60 ... 75	4 ... 13	7 ... 10	12 ... 17	0,3 ... 1,2	80 ... 90	7,66	2120	16,7
Бурый уголь	64 ... 78	0,3 ... 6	3,8 ... 6,3	15,3	0,6 ... 1,6	40 ... 60	27	–	19,5
Каменны й уголь	75 ... 90	0,5 ... 6	4 ... 6	2 ... 13	1 ... 2,7	9 ... 50	33	2130	18,7
Полуан- трацит	90 ... 94	0,5 ... 3	3 ... 4	2 ... 5	1	6 ... 9	34	2130	19,3
Антрацит	93 ... 94	2 ... 3	2	1 ... 2	1	3 ... 4	33	2150	20,2

## Жидкие нефтяные топлива

Топливо	Состав горючей массы, %				Зольность сухого топлива, %	Влага рабочего топлива, %	Низшая теплота сгорания МДж/кг
	C <sup>г</sup>	H <sup>г</sup>	S <sup>г</sup>	O <sup>г</sup> + N <sup>г</sup>			
Бензин	85	14,9	0,05	0,05	0	0	43,8
Керосин	86	13,7	0,2	0,1	0	0	43,0
Дизельное	86,3	13,3	0,3	0,1	следы	следы	42,4
Солярное	86,5	12,8	0,3	0,4	0,02	следы	42,0
Моторное	86,5	12,6	0,4	0,5	0,05	1,5	41,5
Мазут малосернистый	86,5	12,5	0,5	0,5	0,1	1,0	41,3
Мазут сернистый	85	11,8	2,5	0,7	0,15	0,1	40,2
Мазут многосернистый	84	11,5	3,5	0,5	0,1	1,0	40,0

**Мазут** (топочный) – это вид нефтяного топлива (сложная смесь жидких углеводородов). Применяется в качестве котельного топлива. В его состав входят в основном углерод (C<sup>р</sup> = 84 ... 86%) и водород (H<sup>р</sup> = 10 ... 12%); O<sup>р</sup> + N<sup>р</sup> = 1 ... 2%; содержание воды и зольность – не выше 0,2 ... 1,5%. Характеризуется вязкостью (марки М20 ... М200) и содержанием серы S<sup>г</sup> – 0,3 ... 3,5%.



# Нефтяные топлива

**Маркерные сорта нефти** — это сорта нефти с определённым составом (содержание серы, плотность) цены которых определяются рыночно для удобства производителей и потребителей нефти.

«**Brent**», добываемый в Северном море — для рынков Европы и Азии. Цены примерно на 70 % экспортируемых сортов нефти прямо или косвенно задаются на базе котировок Brent.

«**WTI**» (West Texas Intermediate), известная также как «(Texas) Light Sweet» — для западного полушария (США) и как ориентир для других сортов нефти.

«**Dubai Crude**» широко используется при определении цен нефтей, экспортируемых из стран Персидского залива в АТР.

«**Urals**» российская марка экспортной нефтяной смеси. Получается смешением в системе трубопроводов тяжёлой, высокосернистой нефти Урала и Поволжья с лёгкой западносибирской нефтью Siberian Light. Итоговое содержание серы в нефти сорта Urals должно составлять не более 1,2-1,4 %, плотность в 860—871 кг/м<sup>3</sup>.

**Бензины** горючая смесь лёгких углеводородов с температурой кипения от +33 до 205 °С, плотностью около 0,71 г/см<sup>3</sup> и теплотворная способность примерно 32,7 МДж/литр.

Автомобильные бензины характеризуются октановым числом, характеризующим детонационную стойкость топлива, применяемого в двигателях внутреннего сгорания.

Повышение числа: добавки тетроэтил свинца ( $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ ) или изооктаны  $\text{C}_8\text{H}_{18}$ .

# Газообразные топлива

Ископаемое и искусственное газообразное топливо сгорает полностью при небольшом избытке воздуха; не дает дыма, копоти, твердых остатков; удобно для транспортировки на расстояния; сжигание конструктивно проще.

**Природный газ** – из недр земли под давлением до 100 ат. Основной компонент – метан  $\text{CH}_4$ , имеются водород  $\text{H}_2$ , азот  $\text{N}_2$ , высшие углеводороды  $\text{C}_n\text{H}_m$ , оксиды углерода  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ . Очищается от сернистых соединений.

**Попутный газ** содержит меньше метана, но больше высших углеводородов.

**Доменный и коксовый газы** – продукты металлургического производства.

**Сжиженный газ (балонный)** – пропан (не менее 93%  $\text{C}_3\text{H}_8$ ) и бутан (не менее 93%  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ).

**Сжиженный природный газ СПГ** - искусственно сжиженный природный газ путём охлаждения до минус 160 °С для удобства хранения или транспортировки. СПГ состоит на 85—95 % из метана, а в остальные 5 % входят этан, пропан, бутан, азот. Газ очищен от воды, диоксида серы, диоксида углерода. Плотность 0,41—0,5 кг/л. Граница теплоты сгорания 20 МДж/л. **Цикл получения и потребления:** добыча газа, установки предварительной очистки и сжижения газа; технологических линий производства СПГ; резервуаров для хранения и загрузки; танкеры газозовы; газовые морские терминалы безвоздушной регазификации; трубопроводы доставки потребителям. **1 м<sup>3</sup> СПГ ≈ 600 м<sup>3</sup> природного газа**



# Процессы горения

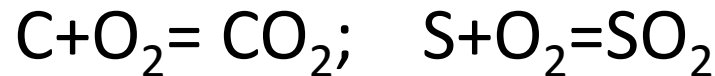
Горение химическая реакция соединения горючих элементов (топлива с окислителем) при высокой температуре сопровождающаяся интенсивным выделением теплоты.

Окислитель - кислород

Стехиометрические уравнения показывают начальные и конечные состояния участвующих в реакциях компонентов.



(2 кг = 1 моль  $\text{H}_2$  + 16 кг = 0,5 моль  $\text{O}_2$  получим 18 кг водяного пара)



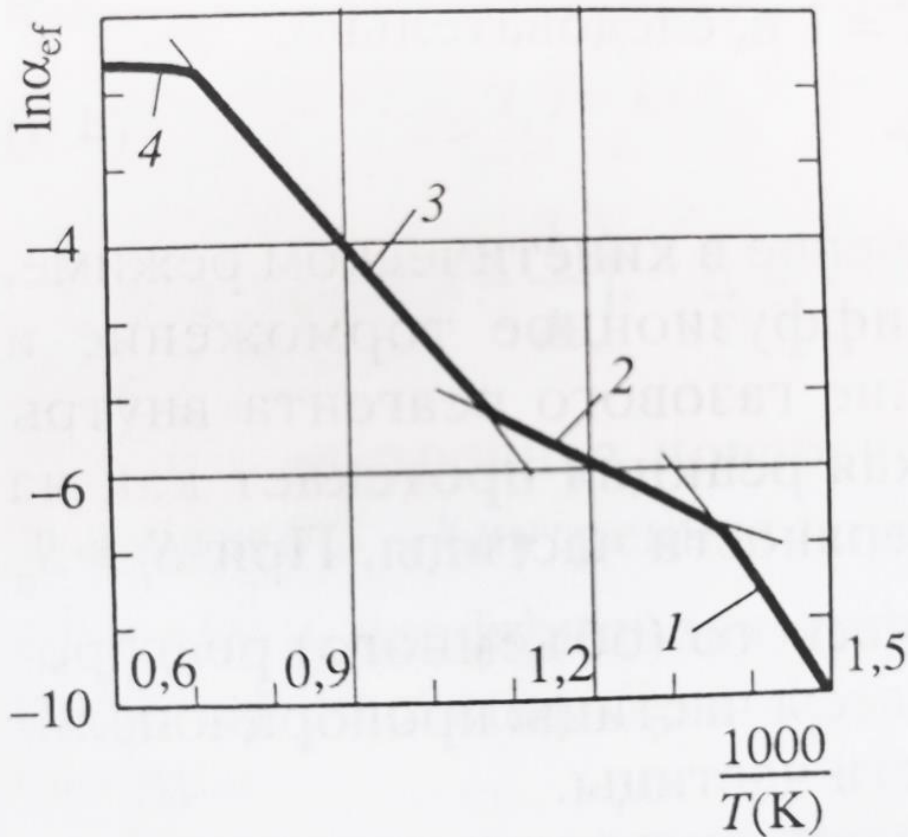
12кг С + 32 кг  $\text{O}_2$  получим 44 кг  $\text{CO}_2$ ; 32 кг S + 32  $\text{O}_2$  получим 64 кг  $\text{SO}_2$

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha = V_{\text{в}} / V_{\text{теор}}$

Хорошие топочные устройства  $\alpha = 1,05-1,1$

Гомогенное горение: **ГАЗ-ГАЗ**

Гетерогенное горение: **ТВЕРДОЕ ТЕЛО – ГАЗ; ЖИДКОСТЬ – ГАЗ**



## Квазистационарная диффузионно-кинетическая теория горения

Скорость и эффективность горения зависит от режимов:

1. внутрекинетический режим горения;
2. внутредиффузионный режим горения;
3. внешнекинетический режим горения
4. Внешнедиффузионный режим горения

Зависимость эффективного реакционного теплообмена от температуры

Полнота сгорания зависит от способа организации горения

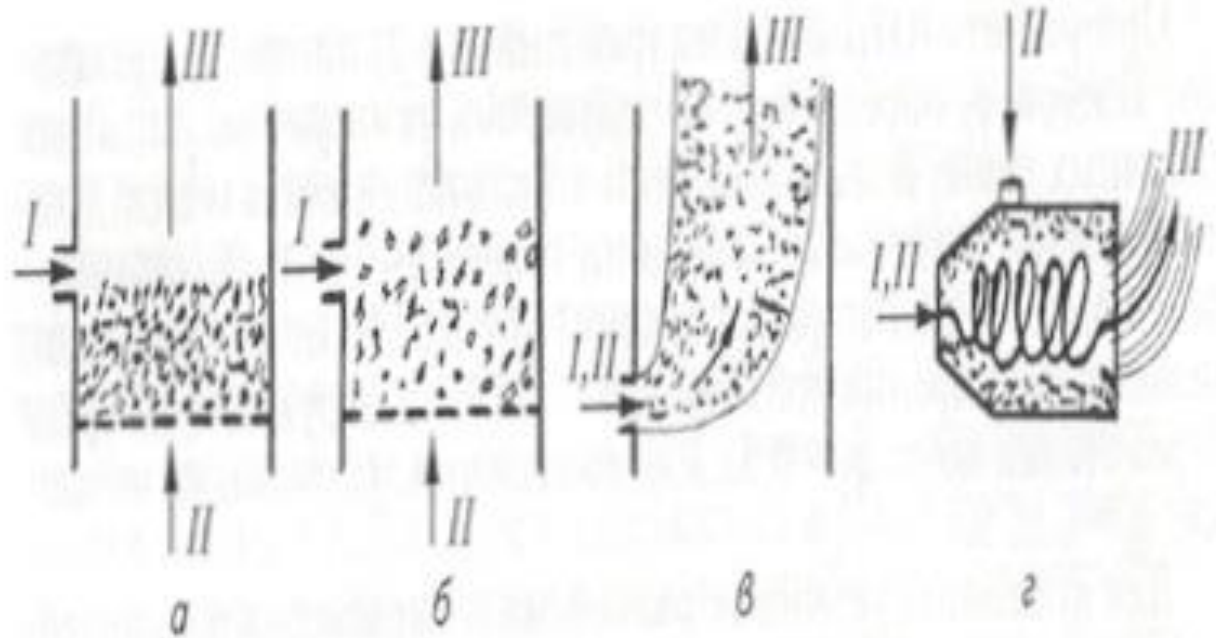
Время горения топлива складывается из времени протекания физических и химических процессов.

Минимальная температура при которой происходит воспламенение топлива называется температурой воспламенения.

# Организация сжигания топлив

Топочное устройство это составная часть тепловой установки (котельной) в которой происходит сжигание топлива, частичное охлаждение продуктов сгорания и осаждения золы.

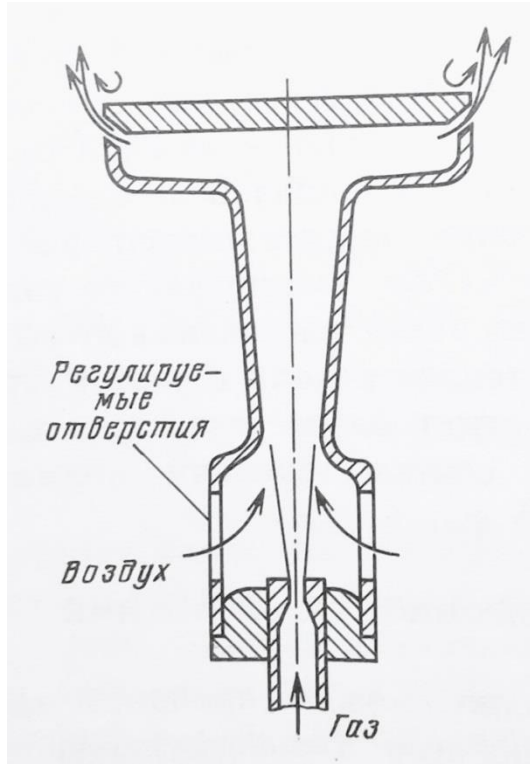
## Твердое топливо



а – слоевое сжигание; б – сжигание в «кипящем» слое; в - факельное сжигание; г – вихревое сжигание . I – топливо; II – воздух ; III – дымовые газы

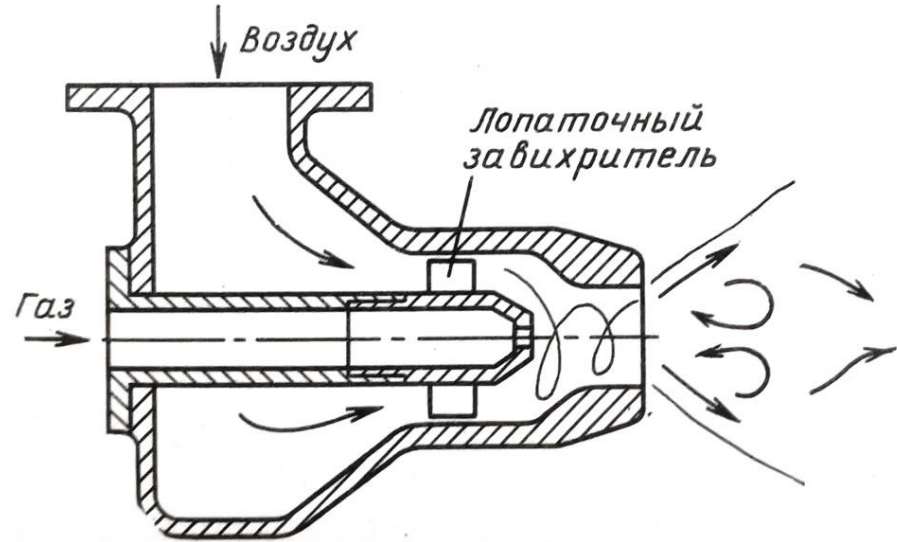
# Сжигание газообразного топлива

Горелки предназначены для ввода газа и окислителя в топку, смешивания потоков до или в процессе горения и стабилизации факела.



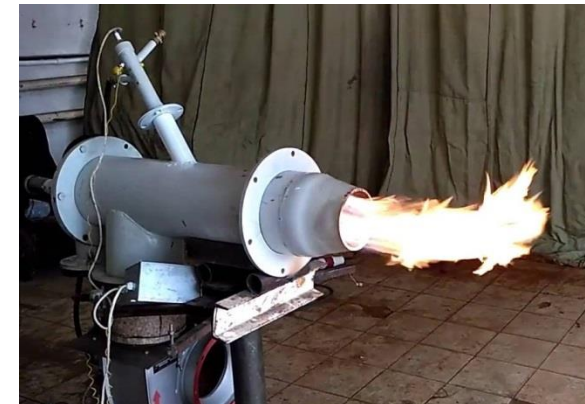
Инжекционная  
горелка

$P_{\max} = 5 \text{ кВт}$



Факельная горелка с принудительной подачей воздуха

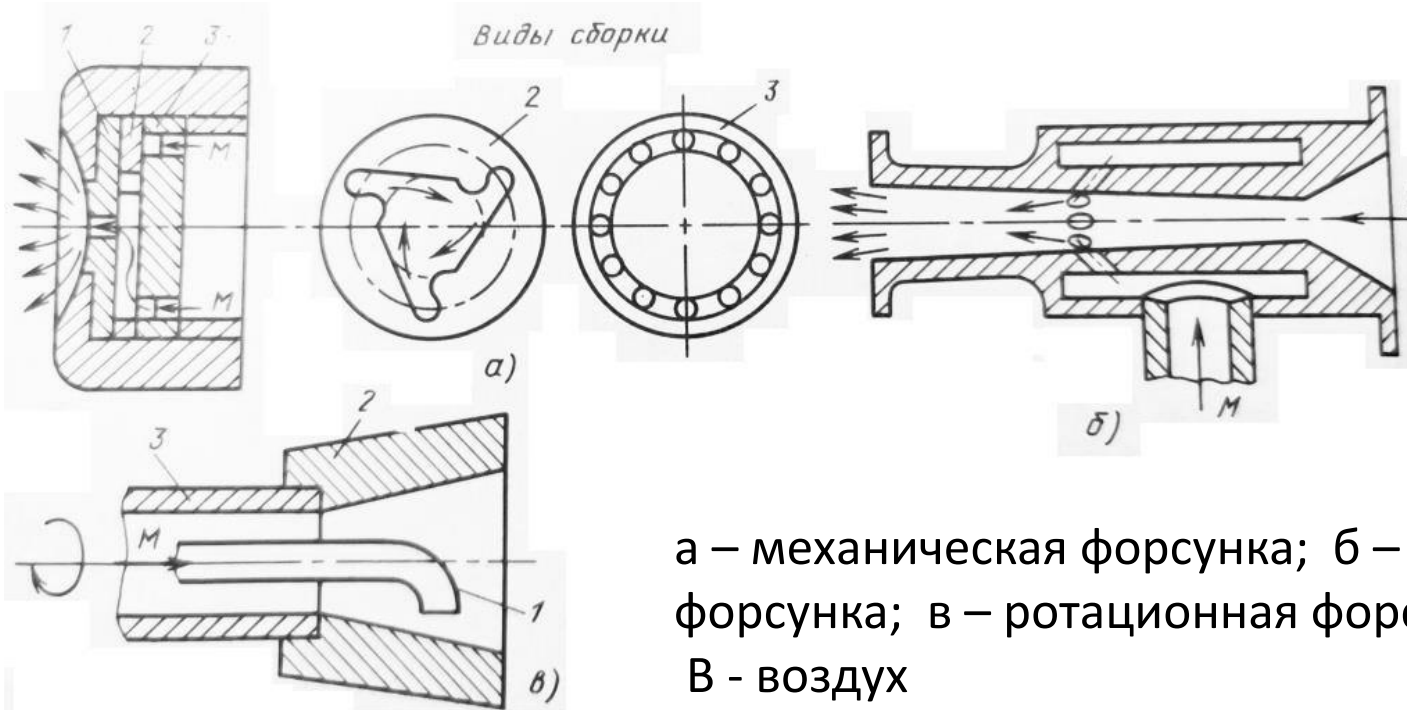
$P_{\max} = 1 \text{ МВт}$     $\alpha = 1,05-1,3$



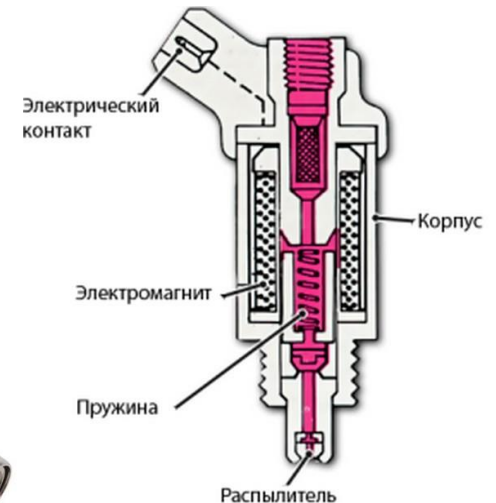


# Сжигание жидкого топлива

**Форсунка** для жидкого топлива: мелкое распыление; хорошее перемешивание с окислителем и надежная стабилизация горения



**Форсунку** устанавливают в **горелку** через которую подается закрученный в завихрителе воздух.





Спасибо за внимание!