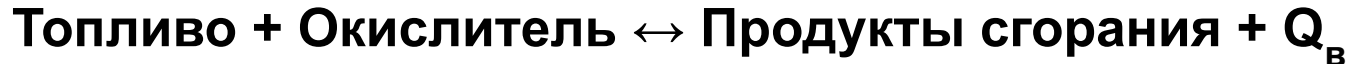


# Горение топлива

Горение происходит по схеме



Реакция окисления является экзотермической, если в результате нее выделяется теплота:  $Q_{\text{в}} > 0$ .

Если в процессе горения существует теплоотвод  $Q_{\text{отв}}$  в окружающую среду, то для устойчивого горения необходимо, чтобы  $Q_{\text{в}} > Q_{\text{отв}}$ , для воспламенения –  $Q_{\text{в}} \geq Q_{\text{отв}}$ , для прекращения горения –  $Q_{\text{в}} < Q_{\text{отв}}$ .

Процесс воспламенения может начаться при подведении к реагентам определенного количества энергии, называемой *энергией активации*. Энергия активации разрушает первоначальные связи молекул топлива и окислителя и создает условия для возникновения реакции.

# Горение топлива

Как и всякая химическая реакция, горение подчиняется закону Аррениуса: скорость реакции  $w_p$ , выражаемая количеством актов химического превращения в единицу времени в единице объема, экспоненциально зависит от температуры:

$$w_p = \frac{k\sqrt{T}}{e^{E/RT}}$$

где  $k$  – константа скорости реакции;  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Скорость горения зависит от температуры, давления, состава смеси, теплообмена с окружающей средой и т. д.

Теория процессов горения в настоящее время развита недостаточно. Уравнения описывают нестационарную пространственную задачу турбулентного теплообмена при наличии источников теплоты и вещества. Эта задача может быть решена численными методами только для некоторых частных случаев.

В инженерной практике пользуются упрощенным подходом, основанным на эмпирических и статистических данных, Поэтому экспериментальная доводка топливосжигающих устройств необходима.

# Коэффициент избытка воздуха

Топливо и окислитель образуют смесь, которая при определенных условиях способна вступать в реакцию окисления. Непосредственно в реакцию окисления вступает кислород, которого в сухом воздухе при нормальных условиях содержится 23,2% (23,14%) по массе и 21% (20,95%) по объему. Около 1% составляют инертные газы, остальное – азот. При технических расчетах инертными газами пренебрегают.

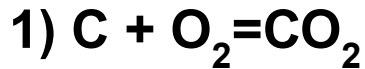
Для расчета процессов горения твердого и жидкого топлива составляют **материальный баланс** процесса горения.

Для твердого и жидкого топлива материальный и тепловой балансы составляют на 1 кг топлива, для газообразной фазы – на 1 м<sup>3</sup> сухого газа при нормальных условиях (0,101325 МПа, 0°С). Объемы воздуха и газообразных продуктов также выражают в метрах кубических, приведенных к нормальным условиям.

Расход кислорода и количество образующихся продуктов сгорания определяются из стехиометрических уравнений горения, записанных для одного моля каждого горючего составляющего. Относя эти уравнения к 1 кг горючего и выразив газообразные вещества в объемных единицах, получают количество кислорода и выход продуктов сгорания на 1 кг каждой составляющей горючей массы топлива в м<sup>3</sup> при давлении 0,1013 МПа (760 мм рт. ст.) и 0°С.

# Материальный баланс для твердого и жидкого топлива

Реакции окисления при полном сгорании:



12 + 32 = 44 - массовые доли в молях.

На 1 кг углерода необходимо  $32/12 = 2,67$  кг кислорода.

В результате получается  $44/12 = 3,7$  кг диоксида углерода.

Иначе:

Молекулярный вес углерода – 12,0112, кислорода – 15,9994.

$12,0112 + 31,9988 = 44,01$  кг/кмоль  $CO_2$

что на 1 кг углерода дает:  $1 \text{ кг } C + 2,6641 \text{ кг } O_2 = 3,6641 \text{ кг } CO_2$

Для полного окисления 1 кмоль углерода (12,0112 кг) расходуется 1 кмоль, т.е. 22,4141 м<sup>3</sup> кислорода и образуется 1 кмоль (22,4141 м<sup>3</sup>) диоксида углерода.

Соответственно для 1 кг углерода потребуется  $22,4141/12,0112 = 1,8661$  м<sup>3</sup> кислорода и образуется 1,8661 м<sup>3</sup>  $CO_2$ .

# Материальный баланс для твердого и жидкого топлива

Как и всякая химическая реакция, горение подчиняется закону Аррениуса: скорость реакции  $w_p$ , выражаемая количеством актов химического превращения в единицу времени в единице объема, экспоненциально зависит от температуры:

$$w_p = \frac{k\sqrt{T}}{e^{E/RT}}$$

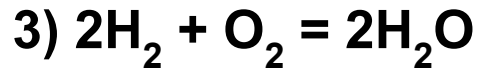
где  $k$  – константа скорости реакции;  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Скорость горения зависит от температуры, давления, состава смеси, теплообмена с окружающей средой и т. д.

Теория процессов горения в настоящее время развита недостаточно. Уравнения описывают нестационарную пространственную задачу турбулентного теплообмена при наличии источников теплоты и вещества. Эта задача может быть решена численными методами только для некоторых частных случаев.

В инженерной практике пользуются упрощенным подходом, основанным на эмпирических и статистических данных. Поэтому экспериментальная доводка топливосжигающих устройств необходима.

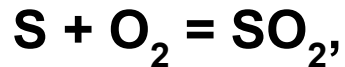
# Материальный баланс для твердого и жидкого топлива



$$2,0159 + 15,9994 = 18,0153,$$

$$\text{На 1 кг водорода: } 1 + 7,9366 = 8,9366 \text{ кг}$$

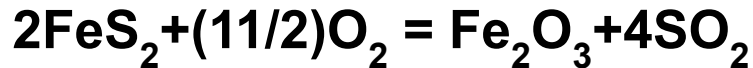
## 4) Горение органической серы



$$32,066 + 31,9988 = 64,0648$$

$$\text{На 1 кг серы: } 1 + 0,9979 = 1,9979 \text{ кг}$$

## 5) Горение колчеданной серы



$$239,958 + 175,9934 = 159,6922 + 256,2592 = \mathbf{415,9514}$$

$$\text{На 1 кг серы: } 1,8708 + 1,3721 = 1,2450 + 1,9979 = \mathbf{3,2429 \text{ кг}}$$

*При сжигании колчеданной серы расход кислорода в 1,37 раза больше, чем при сжигании серы органической.*

# Материальный баланс для твердого и жидкого топлива

Как и всякая химическая реакция, горение подчиняется закону Аррениуса: скорость реакции  $w_p$ , выражаемая количеством актов химического превращения в единицу времени в единице объема, экспоненциально зависит от температуры:

$$w_p = \frac{k\sqrt{T}}{e^{E/RT}}$$

где  $k$  – константа скорости реакции;  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Скорость горения зависит от температуры, давления, состава смеси, теплообмена с окружающей средой и т. д.

Теория процессов горения в настоящее время развита недостаточно. Уравнения описывают нестационарную пространственную задачу турбулентного теплообмена при наличии источников теплоты и вещества. Эта задача может быть решена численными методами только для некоторых частных случаев.

В инженерной практике пользуются упрощенным подходом, основанным на эмпирических и статистических данных. Поэтому экспериментальная доводка топливосжигающих устройств необходима.

# Коэффициент избытка воздуха

● Как и всякая химическая реакция, горение подчиняется закону Аррениуса: скорость реакции  $w_p$ , выражаемая количеством актов химического превращения в единицу времени в единице объема, экспоненциально зависит от температуры:

$$w_p = \frac{k\sqrt{T}}{e^{E/RT}}$$

где  $k$  – константа скорости реакции;  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Скорость горения зависит от температуры, давления, состава смеси, теплообмена с окружающей средой и т. д.

Теория процессов горения в настоящее время развита недостаточно. Уравнения описывают нестационарную пространственную задачу турбулентного теплообмена при наличии источников теплоты и вещества. Эта задача может быть решена численными методами только для некоторых частных случаев.

В инженерной практике пользуются упрощенным подходом, основанным на эмпирических и статистических данных, Поэтому экспериментальная доводка топливосжигающих устройств



# Коэффициент избытка воздуха

Атмосферный воздух всегда содержит влагу в количестве  $d_r$ , г/кг<sub>с.возд</sub>, определяемому по i–d диаграмме.

Увеличение расхода влажного воздуха при стехиометрическом соотношении в кг<sub>возд</sub> / кг<sub>топл</sub>:

$$L_0 = L_0^c (1 + 0,001 d_r)$$

Или в нм<sup>3</sup><sub>с.возд</sub> / кг<sub>топл</sub>:

$$V_0 = V_0^c [1 + 0,001 d_r (\rho_v / \rho_{H_2O})] = V_0^c (1 + 0,00161 d_r)$$

В технических расчетах принимают  $d_r = 10$  г/кг.

# Коэффициент избытка воздуха

Для газообразного топлива стехиометрическое количество воздуха с учетом содержания 21% кислорода по объему составляет для сухого воздуха в  $\text{нм}^3_{\text{с.возд}} / \text{нм}^3_{\text{топл}}$

$$V_0^c = 0,0476[0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 1,5\text{H}_2\text{S} + \sum(m+n/4)\text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2]$$

Для влажного воздуха в  $\text{нм}^3_{\text{с.возд}} / \text{нм}^3_{\text{топл}}$

$$V_0 = V_0^c (1 + 0,00161d_r).$$

На практике количество воздуха, подаваемого на горение, отличается от стехиометрического, поэтому вводят коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , который является одной из важнейших характеристик процесса горения

$$\alpha = L_\alpha / L_0 = V_\alpha / V_0$$

# Коэффициент избытка воздуха

Коэффициент избытка воздуха обычно больше единицы.

Превышение  $\alpha$  над единицей необходимо для

- минимизации потерь с химическим недожогом (обеспечения максимальной полноты сгорания)
- для разбавления продуктов сгорания в целях снижения температуры уходящих (дымовых) газов (если это необходимо).

В отдельных случаях при сжигании жидкого топлива (мазута) и твердых топлив принимают  $\alpha < (0,6...0,8)$ . Образующиеся при этом продукты неполного сгорания (так называемый полугаз) содержат большое количество оксида углерода и водорода, которые используются как топливо при дожигании на переделах технологических процессов.

# Коэффициент избытка воздуха

Коэффициенты избытка воздуха, обеспечивающие  
максимальную полноту сгорания

Вид топочного устройства и топлива	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$
Для газа и мазута	1,05–1,25
Для слоевого сжигания	1,2–1,25
Для твердого топлива и механических топок	1,3–1,4
Для топок с ручным обслуживанием	1,4–1,8

# Коэффициент избытка воздуха

● Как и всякая химическая реакция, горение подчиняется закону Аррениуса: скорость реакции  $w_p$ , выражаемая количеством актов химического превращения в единицу времени в единице объема, экспоненциально зависит от температуры:

$$w_p = \frac{k\sqrt{T}}{e^{E/RT}}$$

где  $k$  – константа скорости реакции;  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Скорость горения зависит от температуры, давления, состава смеси, теплообмена с окружающей средой и т. д.

Теория процессов горения в настоящее время развита недостаточно. Уравнения описывают нестационарную пространственную задачу турбулентного теплообмена при наличии источников теплоты и вещества. Эта задача может быть решена численными методами только для некоторых частных случаев.

В инженерной практике пользуются упрощенным подходом, основанным на эмпирических и статистических данных, Поэтому экспериментальная доводка топливосжигающих устройств необходима.

# Состав и объем продуктов сгорания

При полном сгорании любого топлива в продуктах сгорания присутствуют

- образующиеся при горении оксиды  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$
- азот  $\text{N}_2$ , поступающий в них с воздухом и с топливом
- другие газы и соединения в незначительном количестве, как поступающие в них с воздухом, так и образующиеся в процессе горения (например  $\text{NO}_x$ , смолы, кислоты)

При  $\alpha > 1$  присутствует кислород воздуха.

При  $\alpha < 1$  – продукты химического недожога:  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_m\text{H}_n$  и т. д.

Объем продуктов сгорания дымовых газов при  $\alpha \geq 1$  для любого топлива в  $\text{нм}^3_{\text{пс}} / \text{кг}_{\text{топл}}$ :

$$V_{\alpha}^{\text{пс}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2}$$

# Состав и объем продуктов сгорания

● Как и всякая химическая реакция, горение подчиняется закону Аррениуса: скорость реакции  $w_p$ , выражаемая количеством актов химического превращения в единицу времени в единице объема, экспоненциально зависит от температуры:

$$w_p = \frac{k\sqrt{T}}{e^{E/RT}}$$

где  $k$  – константа скорости реакции;  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Скорость горения зависит от температуры, давления, состава смеси, теплообмена с окружающей средой и т. д.

Теория процессов горения в настоящее время развита недостаточно. Уравнения описывают нестационарную пространственную задачу турбулентного теплообмена при наличии источников теплоты и вещества. Эта задача может быть решена численными методами только для некоторых частных случаев.

В инженерной практике пользуются упрощенным подходом, основанным на эмпирических и статистических данных. Поэтому экспериментальная доводка топливосжигающих устройств необходима.

# Состав и объем продуктов сгорания

Полный объем дымовых газов в  $\text{нм}^3/\text{кг}$ :

$$V^0_{\text{пс}} = V^0_{\text{сг}} + V^0_{\text{H}_2\text{O}}$$

При избытке воздуха  $\alpha > 1$  объемы  $V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}$  не изменяются, а объемы  $V_{\text{N}_2}$ ,  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  и  $V_{\text{O}_2}$  изменяются пропорционально  $\alpha$ .

Для  $\alpha > 1$  нужно прибавить избыточное количество воздуха.

Объем дымовых газов

$$V_{\text{пс}} = V^0_{\text{пс}} + (\alpha - 1)V_0^c$$

Для твердого и жидкого топлив в  $\text{нм}^3/\text{кг}$ :

$$V_{\text{CO}_2} = 0,0186C^p$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,0076S^p$$

$$V_{\text{N}_2} = V^0_{\text{N}_2} + 0,79(\alpha - 1)V_0^c$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1)V_0^c$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V^0_{\text{H}_2\text{O}} + 0,0161(\alpha - 1)V_0^c$$



# Состав и объем продуктов сгорания

Для сухого газа ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ )

Объемные доли трехатомных газов равны парциальным давлениям газов при общем давлении  $1 \text{ кг/см}^2$

$$r_{\text{RO}_2} = (V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}) / V_{\alpha}^{\text{пс}} = V_{\text{RO}_2} / V_{\alpha}^{\text{пс}}$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} / V_{\alpha}^{\text{пс}}$$

Концентрация золы в продуктах сгорания,  $\text{г/м}^3$

$$\mu = (10A^{\text{р}} / V_{\alpha}^{\text{пс}}) \alpha_{\text{ун}}$$

$\alpha_{\text{ун}}$  – доля золы, уносимая дымовыми газами.

# Состав и объем продуктов сгорания

В случае газообразного топлива выражения для определения состава продуктов сгорания остаются без изменения с заменой весовых процентов на объемные.

Объемы продуктов сгорания при сжигании 1 м<sup>3</sup> сухого газообразного топлива в нм<sup>3</sup>/нм<sup>3</sup>:

$$V^0 = 0,0476[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum(m+n/4)C_mH_n - O_2]$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + N_2/100$$

$$V_{RO_2} = 0,01[CO_2 + CO + SO_2 + H_2S + \sum mC_mH_n],$$

Объем водяного пара в нм<sup>3</sup>/нм<sup>3</sup>

$$V_{H_2O}^0 = 0,01[H_2 + H_2S + \sum(n/2)C_mH_n + 0,124d_{г.тл}] + 0,161V^0$$

$d_{г.тл}$  – влагосодержание газообразного топлива, отнесенное к 1 м<sup>3</sup> сухого газа, г/м<sup>3</sup>.

Влагосодержание продуктов сгорания в г/кг<sub>пс</sub>

$$d_{пс} = 804V_{H_2O} / (1,977 V_{RO_2} + 1,251V_{N_2} + 1,429V_{O_2}).$$

# Материальный баланс процесса горения

Уравнение материального баланса составляют для контроля правильности расчетов состава и объема продуктов реакции. Расчет ведут обычно на  $100 \text{ нм}^3$  или на  $100 \text{ кг}$  топлива.

$$m_T + m_B = m_{\text{пс}},$$

$m_T$ ,  $m_B$  и  $m_{\text{пс}}$  – массы топлива, воздуха и продуктов горения соответственно,  $\text{кг/кг}$  или  $\text{кг/нм}^3$ .

Приход массы с топливом,  $\text{кг}$

$$m_T = 100 \rho_{\text{вл}} \text{ кг газа – для газа,}$$

$$m_T = 100 \text{ кг – для твердого и жидкого топлива.}$$

Приход массы с воздухом

$$m_B = 100 \alpha V^0 \rho_B \text{ кг газа – для газообразного топлива}$$

$\rho_B$  вычисляют по формуле для  $\rho_{\text{вл}}$  с подстановкой плотности сухого воздуха при нормальных условиях.

$$m_B = 100(\alpha L_0 + w_{\text{п}}) \text{ – для твердого и жидкого топлива.}$$

# Материальный баланс процесса горения

Расход массы, кг

$$m_{\text{пг}} = m_{\text{RO}_2}^{\Gamma} + m_{\text{N}_2}^{\Gamma} + m_{\text{O}_2}^{\Gamma} + m_{\text{SO}_2}^{\Gamma} + m_{\text{W}}^{\Gamma} + m_{\text{A}}^{\Gamma} = \sum m_i + m_{\text{A}}^{\Gamma}$$

Здесь

$$m_i = 100V_i \rho_i$$

$V_i$  – объемная доля  $i$ -го газа в продуктах сгорания

$\rho_i$  – плотность газов при нормальных условиях

$m_{\text{A}}^{\Gamma} = 100A^{\text{P}}$  – количество золы в топливе

Невязка материального баланса при ручном счете не должна превышать 1%.

# Тепловой баланс процесса горения

Уравнение теплового баланса можно рассматривать как уравнение энергии: сумма физических теплот топлива, окислителя и химической теплоты, выделившейся в процессе горения, расходуется на нагрев продуктов сгорания и их диссоциацию.

Диссоциация является следствием обратимости реакции горения и происходит с поглощением теплоты.

При расчетах определяют теоретическую температуру топлива без учета потерь и действительную с учетом потерь, связанных с механическим, химическим недожогом или теплопереносом в окружающую среду через стенку топки и др.

Действительную температуру определяют приближенно, поскольку трудно учесть конструктивные особенности топливосжигающих устройств, конкретные условия их эксплуатации и т. д. Обычно совершенство процесса горения учитывается коэффициентом полноты сгорания  $\eta$ .

# Тепловой баланс процесса горения

Значения коэффициента полноты сгорания топлива для различных типов топок

Вид топливосжигающего устройства	Вид топлива	$\eta$
Промышленные топки туннельных и шахтных печей промышленности стройматериалов	Газ, мазут	0,78-0,83
	Твердое	0,52-0,62
Вращающиеся печи цементной и известковой промышленности	Газ, мазут, пылеугольное топливо	0,7-0,75
Вихревые и циклонные топки ТЭЦ	Газ, мазут, пылеугольное топливо	0,85-0,95
Камеры сгорания ГТД и ГТУ	Газ, керосин	0,95-0,99

# Тепловой баланс процесса горения

Теплота, выделившаяся при сгорании 1 кг массы (1 нм<sup>3</sup>) топлива и действительно затраченная на нагревание рабочего тела

$$Q = Q_{\text{в}}^{\text{р}} - Q_{\text{H}_2\text{O}} - Q_{\text{окр}} - Q_{\text{нед}}$$

$Q_{\text{H}_2\text{O}}$  – теплота парообразования

$Q_{\text{окр}}$  – потери тепла в окружающую среду

$Q_{\text{нед}}$  – потери тепла вследствие механического и химического недожога топлива

Коэффициент полноты сгорания топлива  $\eta_{\text{г}}$  или термодинамический коэффициент использования тепла топлива (КИТ)

$$\eta_{\text{г}} = (Q_{\text{н}}^{\text{р}} - Q_{\text{окр}} - Q_{\text{нед}}) / Q_{\text{н}}^{\text{р}}$$

# Тепловой баланс процесса горения

Уравнение теплового баланса реального процесса на 1 кг массы твердого и жидкого топлива или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива имеет вид

$$Q_H^p \eta_{\Gamma} + c_T t_T + c_V t_V V_{\alpha} - q_{\text{дис}} = V_{\text{пс}} i_{\text{пс}}$$

$c_T t_T$  – физическая теплота топлива

$c_V t_V V_{\alpha}$  – физическая теплота воздуха

$q_{\text{дис}}$  – теплота диссоциации

$V_{\text{пс}}$  – объем продуктов сгорания с учетом диссоциации

$i_{\text{пс}} = c_{\text{пс}} t_{\Gamma}$  – теплосодержание (энтальпия) топлива воздуха и продуктов сгорания, °С.

Теплоту диссоциации необходимо учитывать при температурах горения свыше 1700...1800 °С.

В расчетах часто полагают, что потери теплоты на диссоциацию входят в коэффициент полноты сгорания топлива.



# Тепловой баланс процесса горения

Энтальпию продуктов сгорания в  $\text{кДж/м}^3$  можно выразить как

$$i_{\text{пс}} = (Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{г}} + c_{\text{т}} t_{\text{т}} + c_{\text{в}} t_{\text{в}} V_{\alpha} - q_{\text{дис}}) / V_{\text{пс}}$$

В расчетах промышленных топливосжигающих устройств при сжигании промысловых газов, мазута, твердых топлив с  $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 8400 \dots 12500 \text{ кДж/кг}$  с достаточной для практики точностью температура горения может быть определена по диаграмме  $i_{\text{пс}} - t_{\text{г}}$

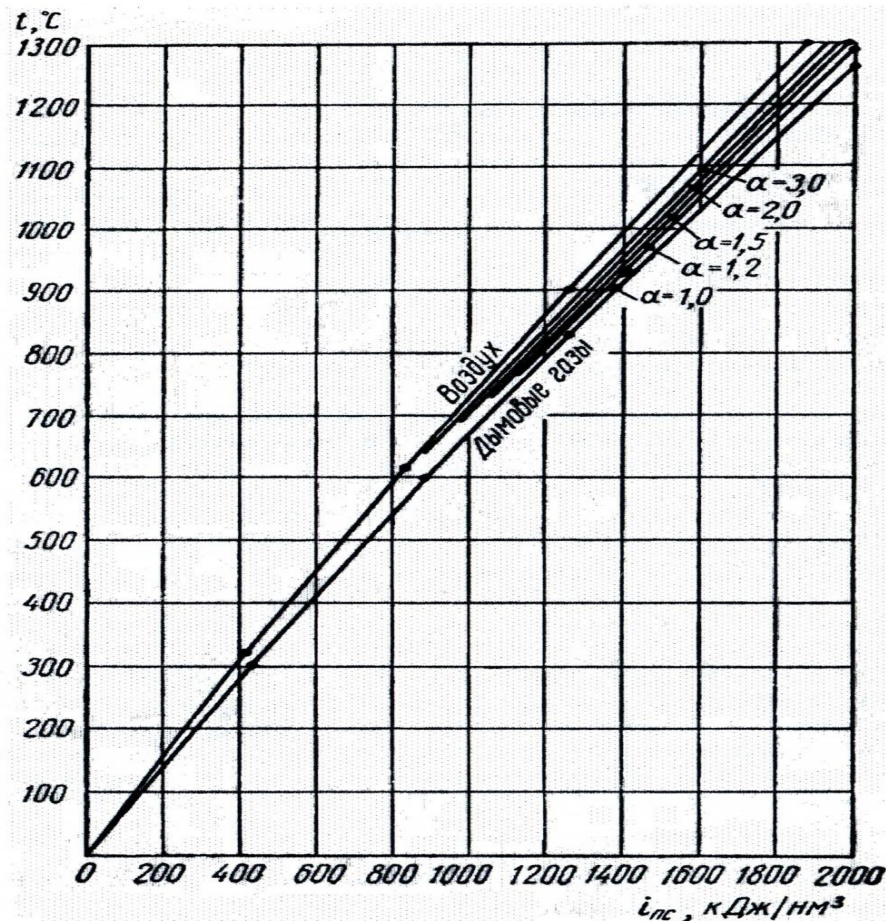


Рис. 2.  $i-t$ -диаграмма для низких температур

# Тепловой баланс процесса горения

● Как и всякая химическая реакция, горение подчиняется закону Аррениуса: скорость реакции  $w_p$ , выражаемая количеством актов химического превращения в единицу времени в единице объема, экспоненциально зависит от температуры:

$$w_p = \frac{k\sqrt{T}}{e^{E/RT}}$$

где  $k$  – константа скорости реакции;  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Скорость горения зависит от температуры, давления, состава смеси, теплообмена с окружающей средой и т. д.

Теория процессов горения в настоящее время развита недостаточно. Уравнения описывают нестационарную пространственную задачу турбулентного теплообмена при наличии источников теплоты и вещества. Эта задача может быть решена численными методами только для некоторых частных случаев.

В инженерной практике пользуются упрощенным подходом, основанным на эмпирических и статистических данных. Поэтому экспериментальная доводка топливосжигающих устройств необходима.

# Теплоемкости

Для упрощения расчетов термодинамических процессов У.Гиббсом введена функция  $J$  для  $m$  кг массы, называемая **энтальпией** и  $i$  для 1 кг массы, называемая **удельной энтальпией**.

Физический смысл энтальпии состоит в том, что в **изобарных процессах** изменение энтальпии равно **количеству теплоты**, поглощенной или отданной системой.

В термодинамике не требуется знание абсолютного значения энтальпии, поэтому ее отсчитывают от некоторого **условного нуля**. Для идеального газа принято считать энтальпию равной нулю при температуре  $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Приращение энтальпии для любого процесса изменения состояния газа в пределах одной фазы определяется по формуле

$$\Delta i_{1-2} = i_2 - i_1 = \check{c}_p (T_2 - T_1).$$

Если считать, что  $i_{t=0} = 0$ , то энтальпия газа при температуре  $t$

$$i = \check{c}_p t, \text{ кДж/кг}$$

Эта формула показывает, что удельная энтальпия идеального газа численно равна количеству теплоты, которая подведена к 1 кг газа при нагревании его от  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  до температуры  $t \text{ }^\circ\text{C}$  при постоянном давлении

# Теплоемкости

**Удельной теплоемкостью** называется количество теплоты, которое нужно подвести к единице количества вещества или отнять от него для изменения температуры вещества на 1 градус (К или °С).

Истинные теплоемкости

$$\begin{aligned} c_p &= f(T) \\ c_v &= f(T) \end{aligned} \quad c_{\text{ист}} = \frac{dq}{dt} = c$$

Средняя теплоемкость

$$\bar{c} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c dt$$

$$\bar{c}_p \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_p}{t_2 - t_1} = \frac{\bar{c}_p \Big|_0^{t_2} t_2 - \bar{c}_p \Big|_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}$$

# Теплоемкости

## Приложение 2

**Средняя объемная теплоемкость продуктов полного сгорания  
и воздуха, кДж/(м<sup>3</sup>·К), при постоянном давлении  
в интервале температур от 0 до  $t$**

Температура $t$ , °С	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Сухой воздух	Влажный воздух
0	1,603	1,295	1,306	1,494	1,297	1,319
100	1,704	1,296	1,317	1,505	1,300	1,324
200	1,791	1,299	1,335	1,521	1,307	1,332
300	1,867	1,308	1,356	1,541	1,316	1,342
400	1,934	1,316	1,377	1,564	1,328	1,355
500	1,993	1,328	1,398	1,588	1,341	1,368

# Теплоемкости

В интервале температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  удельную теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении можно считать постоянной –  $c_{p,c} = 1,006 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ .

Для диапазона температур от минус  $-50$  до  $50^{\circ}\text{C}$  удельную теплоемкость насыщенного водяного пара принято считать постоянной и равной –  $c_{pп} = 1,86 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ .

Удельная теплоемкость водяного пара,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$

$t, ^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60
$c_{pп}$	1,864	1,868	1,874	1,883	1,894	1,907	1,924

$$\mu_{\text{возд}} = 28,95 [\text{кг}/\text{кмоль}]$$

$$\mu_{\text{пара}} = 18,016 [\text{кг}/\text{кмоль}]$$

Плотность газа при нормальных условиях

$$\rho_n = \frac{\mu}{22,4} [\text{кг}/\text{м}^3]$$

# Теплоемкости

*Теплоемкость влажного воздуха равна сумме теплоемкостей 1 кг сухого воздуха и d кг пара*

$$c_p = c_{pв} + dc_{pп}$$

Газ	Формула	Число степеней свободы	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль*град)
Кислород	O <sub>2</sub>	5	20,85
Азот	N <sub>2</sub>	5	20,72
Водород	H <sub>2</sub>	5	20,26
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	6	28,13
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	6	28,47
Сернистый ангидрид	SO <sub>2</sub>	6	32,24

# Температура горения топлива

Тепло, выделяющееся при сгорании топлива, воспринимается продуктами сгорания, которые нагреваются до определенной температуры, называемой температурой горения.

Различают **калориметрическую, теоретическую и действительную** температуры сгорания топлива.

В уравнение теплового баланса реального горения входят составляющие, величина которых зависит от теплофизических свойств топлива и от условий, при которых протекает горение, от степени подогрева топлива и воздуха, потерь теплоты при горении, тепловосприятия в топке, коэффициента избытка воздуха.

Чтобы выявить потенциальные возможности топлива, вводят понятие **теоретической** температуры горения – без подогрева топлива и воздуха при идеальном адиабатическом процессе, т. е. горения с теоретическим количеством воздуха, без потерь теплоты и без теплообмена в топочной камере и с окружающей средой.



# Температура горения топлива

**Калориметрическая температура** отличается от теоретической тем, что при ее определении пренебрегают потерями тепла на диссоциацию продуктов сгорания.

Калориметрическая температура (жаропроизводительность) является физической характеристикой топлива. Отношение действительной температуры горения топлива к калориметрической называется ***пирометрическим коэффициентом***.

Пирометрический коэффициент зависит от условий сжигания топлива и определяется экспериментально. Приближенные значения пирометрического коэффициента для камерных печей (газовое и жидкое топливо) 0,73–0,83; для туннельных печей 0,78–0,83. При беспламенном способе сжигания газа  $h_{\text{пир}} \gg 0,9$ .

# Вынужденное воспламенение

## **Гомогенная система** газ–газ (воздух)

Если топливо и окислитель заранее тщательно перемешаны, то получается химически однородная гомогенная газовая система. При раздельной подаче топлива и окислителя в зону горения система получается неоднородной.

## **Гетерогенная система** жидкость (твердое тело) — газ.

Существует при сжигании жидких или твердых топлив. В отдельных частях общего объема гетерогенной системы образуется смесь паров или газообразных веществ исходных топлив — гомогенная фаза гетерогенной системы.

В топливосжигающих устройствах всегда осуществляется вынужденное воспламенение (зажигание) горючей смеси: смесь с температурой намного ниже  $T_v$  воспламеняется после интенсивного подвода теплоты к небольшой части общего объема от постороннего источника (постороннего пламени, электрической искры, раскаленного тела и т. д.). Результаты исследований показывают, что существуют границы возможного вынужденного воспламенения по начальной температуре, составу смеси, ее давлению. Кроме того, имеются общие пределы воспламенения смеси от какого бы то ни было источника.

# Вынужденное воспламенение

## ***Воспламеняющаяся смесь***

Это смесь, в которой пламя может неограниченно распространяться от источника воспламенения даже при кратковременном его действии.

## ***Невоспламеняющаяся смесь***

Это смесь, в которой даже при наличии вспышки после удаления источника воспламенения горение прекращается.

Воспламеняющаяся смесь топлива с воздухом при добавлении, например, инертного газа или избыточного количества воздуха или при чрезмерном обогащении топливом может стать невоспламеняющейся.

Для воздушных смесей с парами бензина или керосина пределы воспламенения определяются коэффициентами избытка воздуха:  $\alpha_{\min} = 0,2 \dots 0,3$  – богатый предел;  $\alpha_{\max} = 1,8 \dots 2$  – бедный предел. С понижением температуры смеси границы воспламенения сужаются.

# Вынужденное воспламенение

Следует иметь в виду, что пределы воспламенения заранее неперемешанных смесей, например при введении мелкораздробленного жидкого топлива в поток воздуха, значительно расширяются.

В этом случае воспламенение топлива осуществляется за счет горения частей смеси оптимального состава, образующихся в общем объеме.

Пределы воспламенения смеси значительно зависят от условий зажигания, подачи топлива, размеров отдельных капель в струе топлива и т. д. С повышением давления в смеси температура зажигания понижается.

# Сжигание газообразного топлива

Сжигание газов производится в топочной камере, куда горючая смесь подается через горелки. В топочном пространстве образуется струя горящего газа, называемая факелом.

В зависимости от способа подачи воздуха, необходимого для горения, возможны следующие виды сжигания газов:

- горение однородной газовой смеси, когда сжигается предварительно подготовленная горючая газовая смесь;
- диффузионное горение газов, когда газ и воздух подаются раздельно;
- горение смеси газов с недостаточным количеством воздуха, когда газ подается в смеси с воздухом, но количество последнего недостаточно для полного сгорания.

# Сжигание газообразного топлива

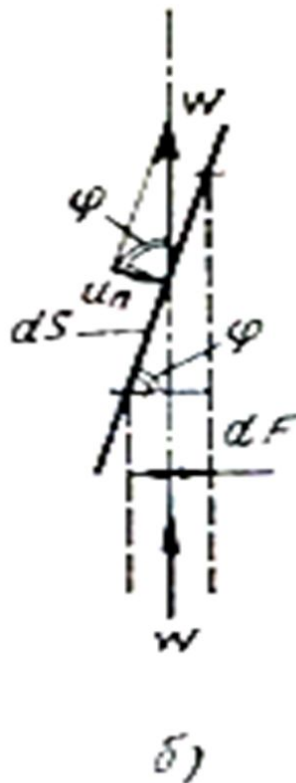
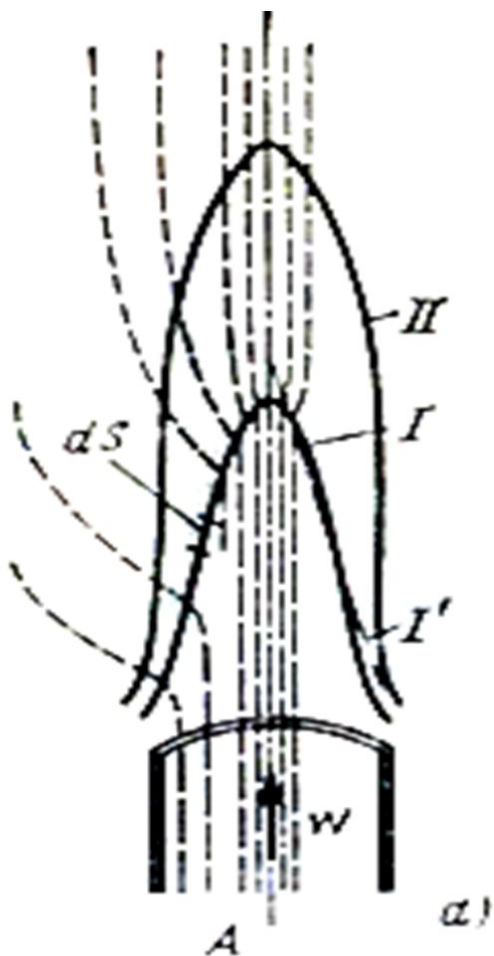
В однородной предварительной перемешанной смеси интенсивность горения зависит только от кинетики самих химических реакций, поэтому такой вид горения называют **кинетическим**.

Горение благодаря распространению пламени в горючей смеси, непрерывно поступающей в топочную камеру. В зависимости от характера движения горючей смеси различают **ламинарное горение и турбулентное горение**.

## Диффузионное горение

В случае, когда через горелку подается газ, не содержащий в себе кислорода, при его поджигании горение происходит за счет потребления кислорода окружающего воздуха, поступающего посредством диффузии. Так как в данном случае газ и воздух подаются отдельно, а горение происходит в процессе их взаимной диффузии, причем скорость горения определяется интенсивностью процесса смешения, то подобное горение называют диффузионным.

# Ламинарное горение



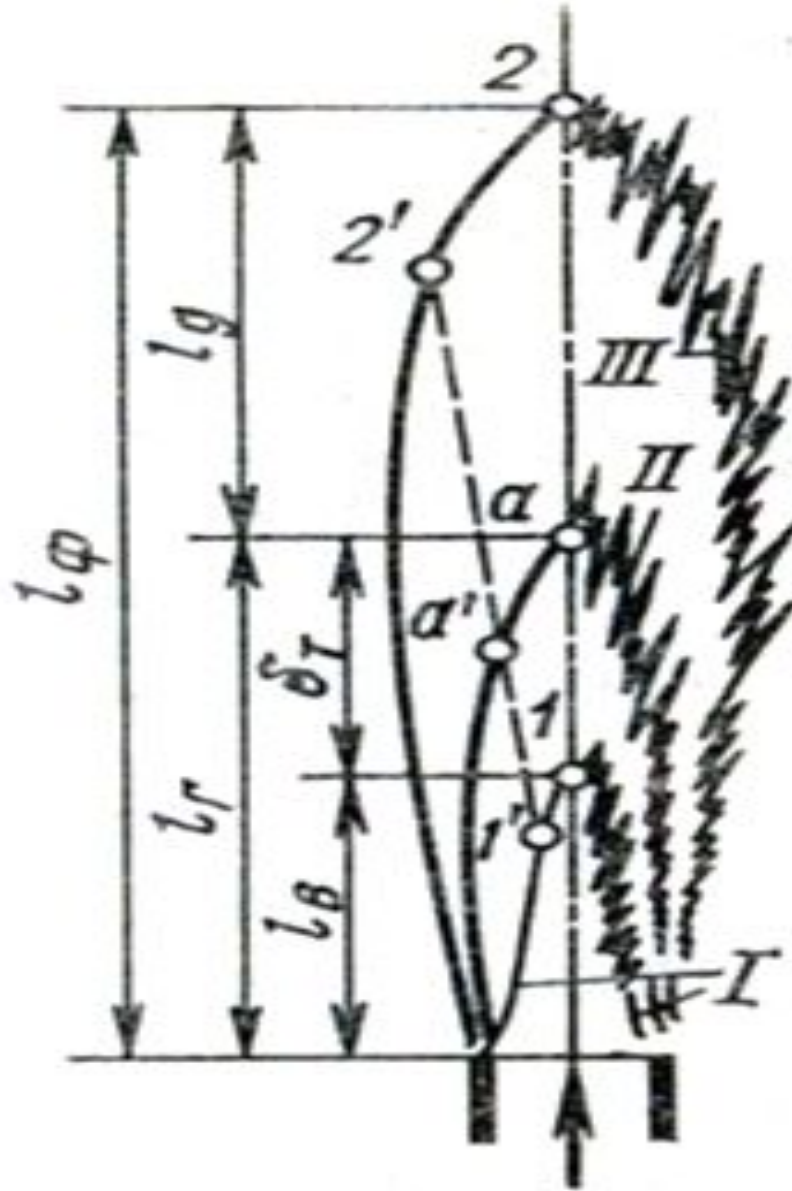
$$u_n = w \cos \varphi$$

$$u_n = V/S_{\text{пл}}$$

$V$  – секундный объемный расход газа через горелку

$S_{\text{пл}}$  – площадь поверхности пламени

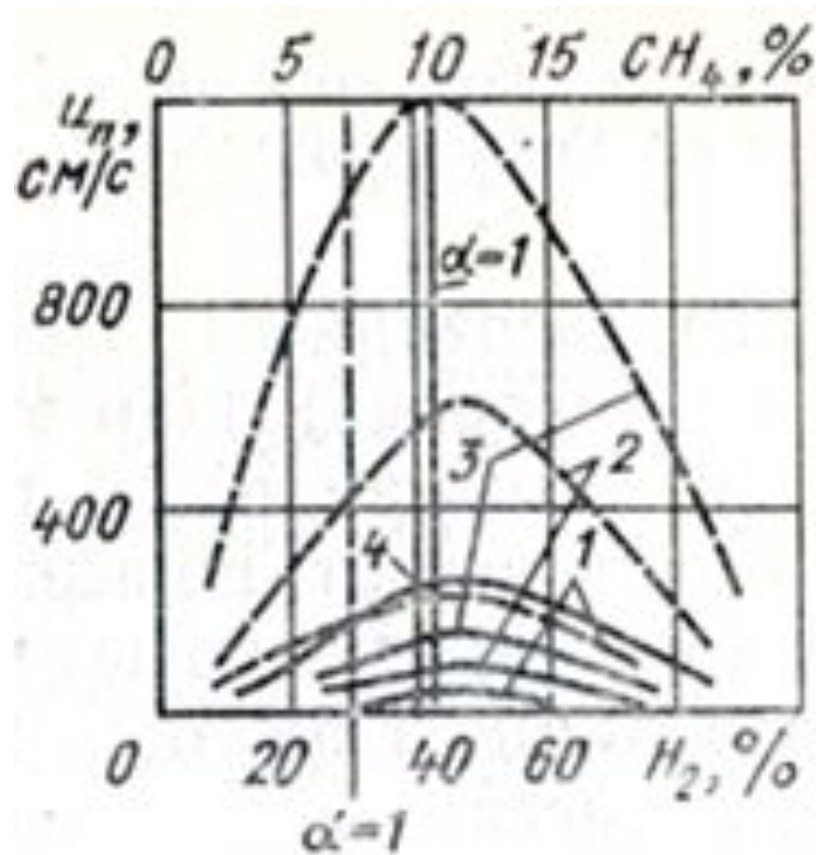
# Турбулентное горение





# Скорость движения фронта пламени

## Ламинарный поток



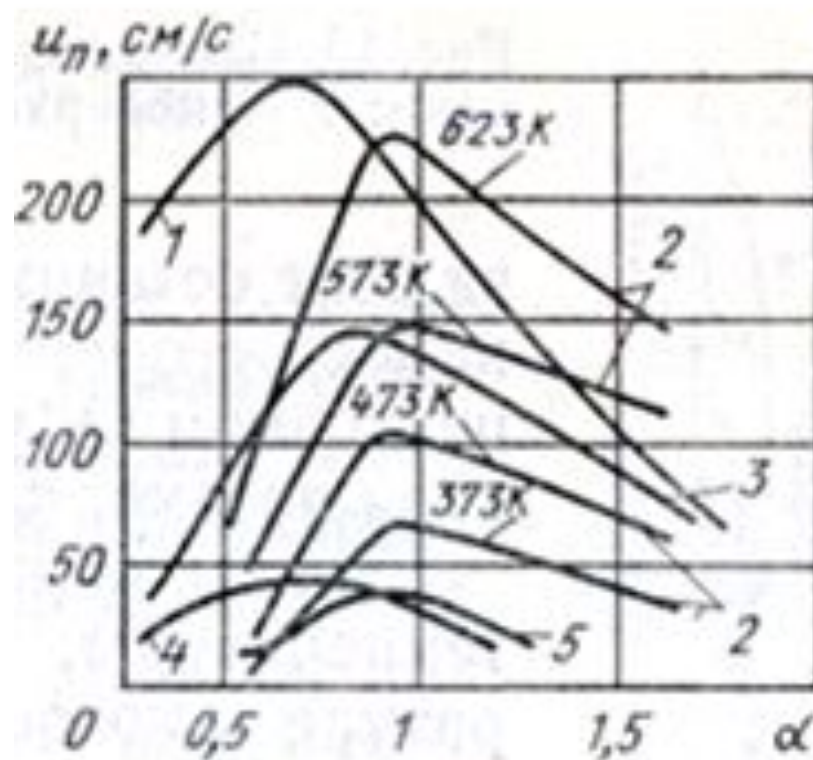
Изменение скорости  $u_n$  газоздушных смесей в зависимости от температуры  $T$  и коэффициента  $\alpha$  избытка воздуха:

1 –  $T = 293\text{K}$ ; 2 –  $T = 473\text{K}$ ; 3 –  $T = 673\text{K}$ ; 4 –  $T = 873\text{K}$ ;

———— смеси  $\text{CH}_4$ ; - - - - - смеси  $\text{H}_2$

# Скорость движения фронта пламени

## Ламинарный поток



Зависимость нормальной скорости  $u_n$  распространения пламени бензино- и газозвоздушных смесей от коэффициента  $\alpha$  избытка воздуха в смеси:

1 – H<sub>2</sub>; 2 – бензин; 3 – C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>; 4 – CO; 5 – CH<sub>4</sub>

# Скорость движения фронта пламени

$u_T$  – скорость распространения фронта пламени в турбулентном потоке, характеризует объем вступивших в реакцию веществ за единицу времени на единице поверхности фронта пламени.

Это – средняя турбулентная скорость распространения фронта пламени. Величину  $u_T$  определяют, подсчитывая объемный расход смеси  $V$  и находя осредненную площадь  $S_{пл}$  поверхности пламени.

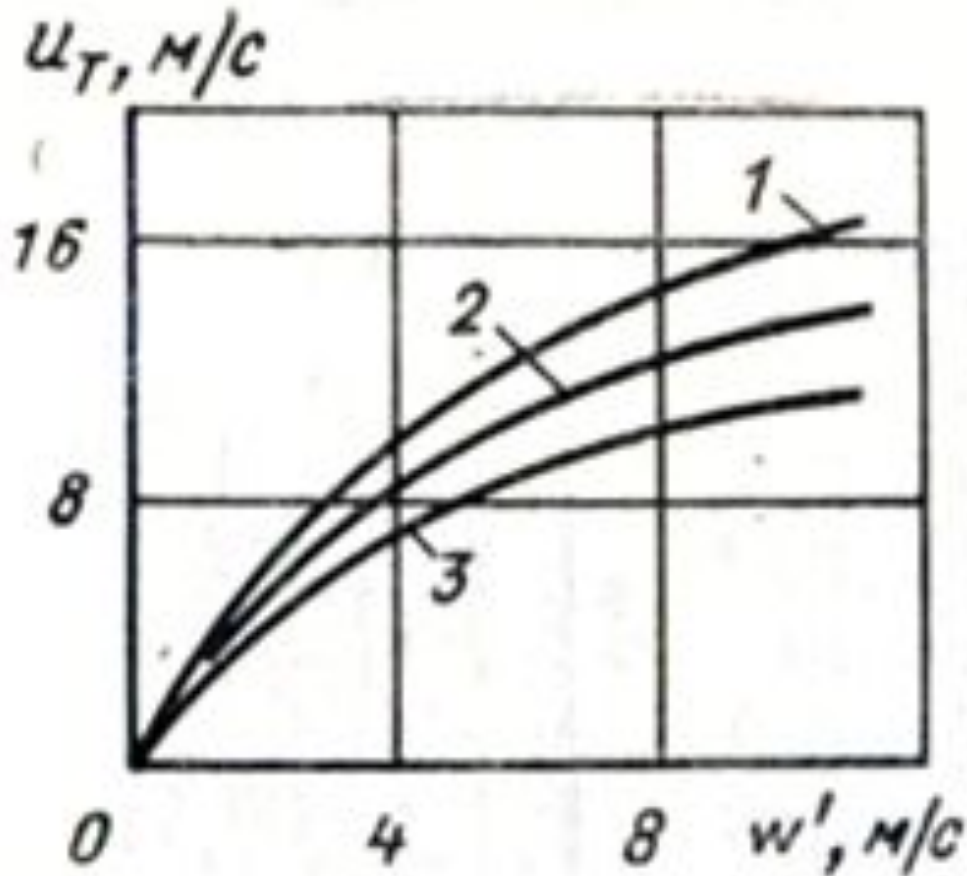
$$u_T = V/S_{пл}$$

Локальную скорость  $u_T$  находят, рассматривая элементарную площадку  $dS$  фронта пламени  $S_{пл}$ . При  $dS \rightarrow 0$  скорость  $u_T = w \cos \varphi$

Истинное мгновенное значение скорости турбулентного потока  $w_M$  определяется как сумма средней скорости за значительный интервал времени  $w_{cp} = w$  и пульсационной скорости  $w'$ .

Пульсационная скорость определяется как среднеквадратическая:  
 $w' = \text{sqr} (\hat{w})^2$ .

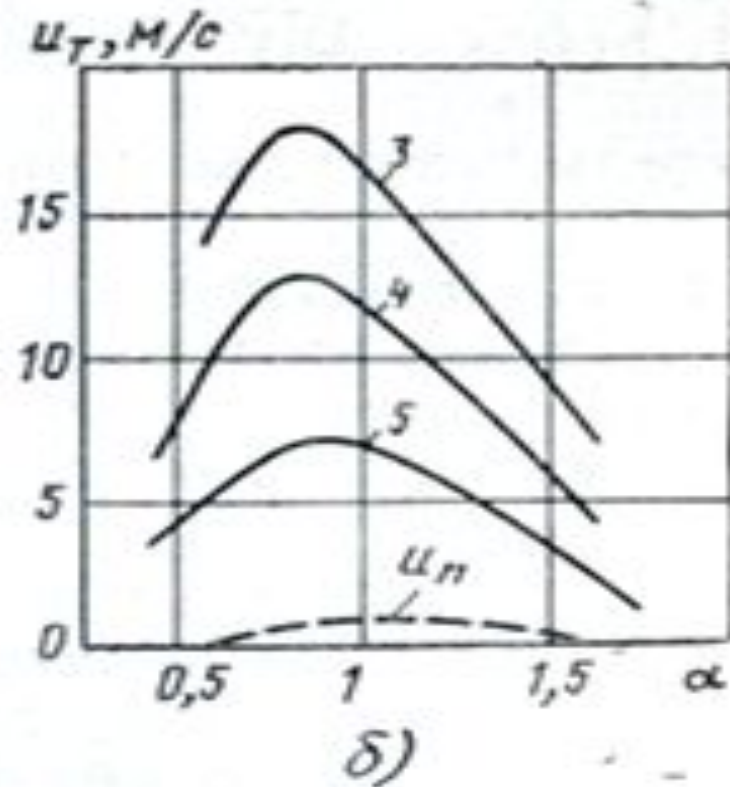
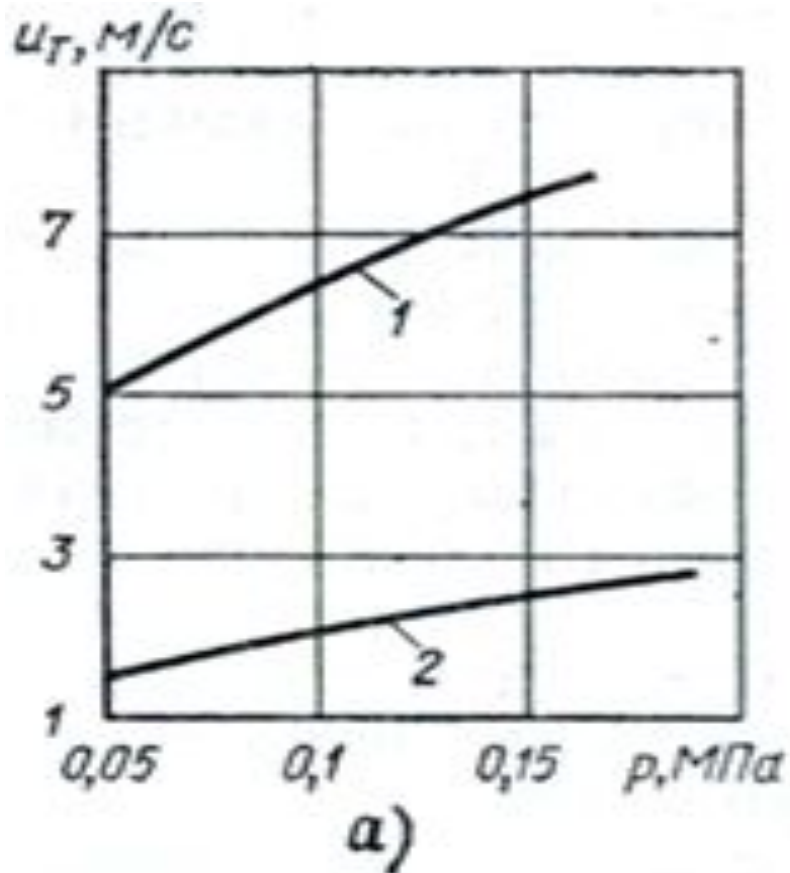
# Скорость движения фронта пламени



Зависимости скорости  $u_T$  от  $w'$  при различных  $u_n$  горючей смеси

- 1 —  $u_n = 40$  см/с;
- 2 —  $u_n = 30$  см/с;
- 3 —  $u_n = 20$  см/с

# Скорость движения фронта пламени



Зависимости скорости  $u_T$  от давления  $p$  ( $\alpha = 1,5$ ) и коэффициента  $\alpha$  избытка воздуха:

- 1 —  $w = 80$  м/с; 2 —  $w = 20$  м/с; 3 —  $w = 115$  м/с;  
4 —  $w = 75$  м/с; 5 —  $w = 31$  м/с.

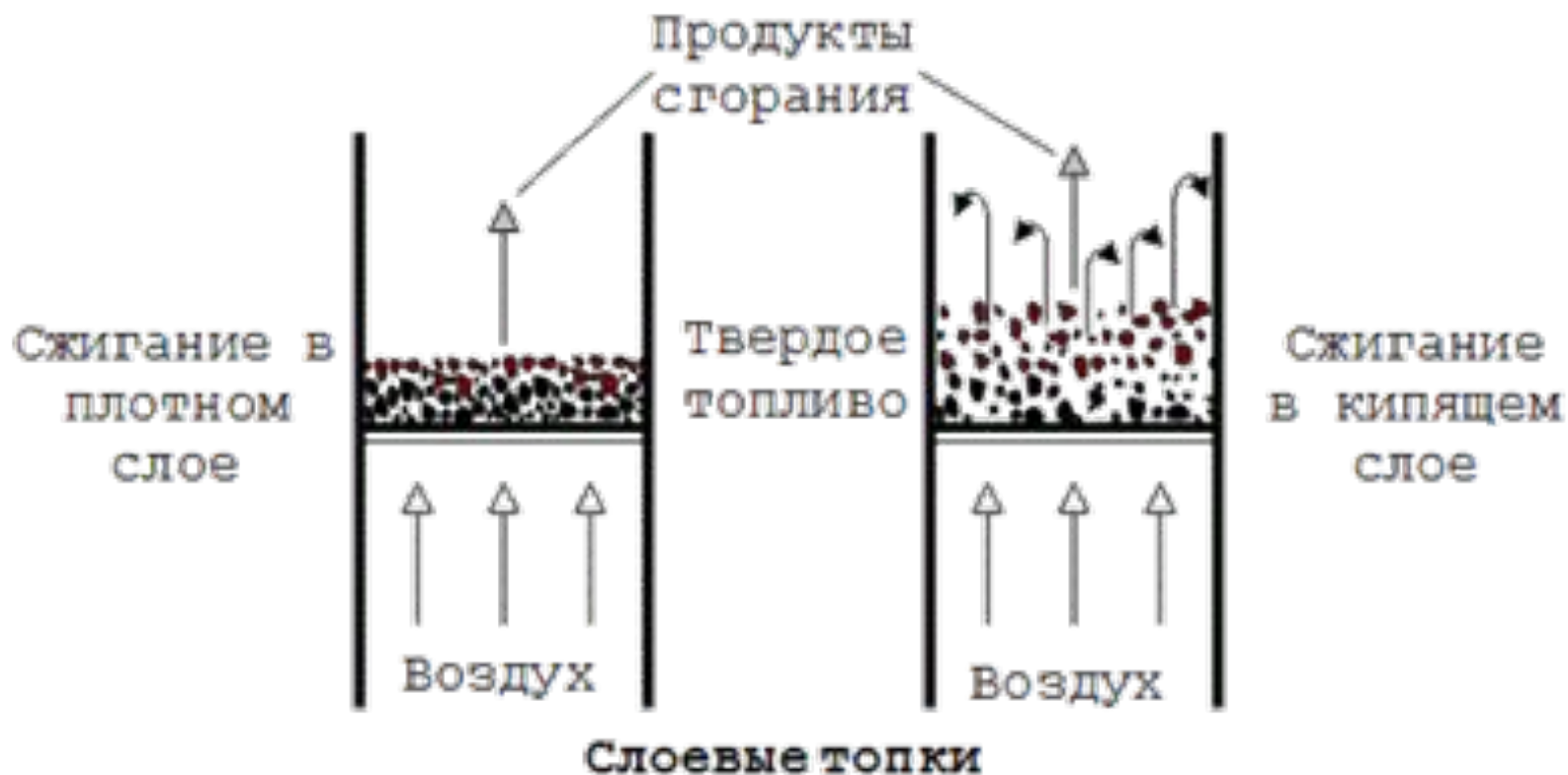
# Скорость детонационного горения

Значения скорости детонационного горения для  
некоторых смесей

Смесь	$w_D$ , м/с
$2\text{H}_2 + \text{O}_2$	2821
$2\text{CO} + \text{O}_2$	1264
$2\text{CO} + \text{O}_2 + 5,6\% \text{H}_2\text{O}$	1738
$\text{CH}_4 + \text{O}_2$	2528
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$	2146
$\text{C}_2\text{H}_2 + 1,5\text{O}_2$	2716

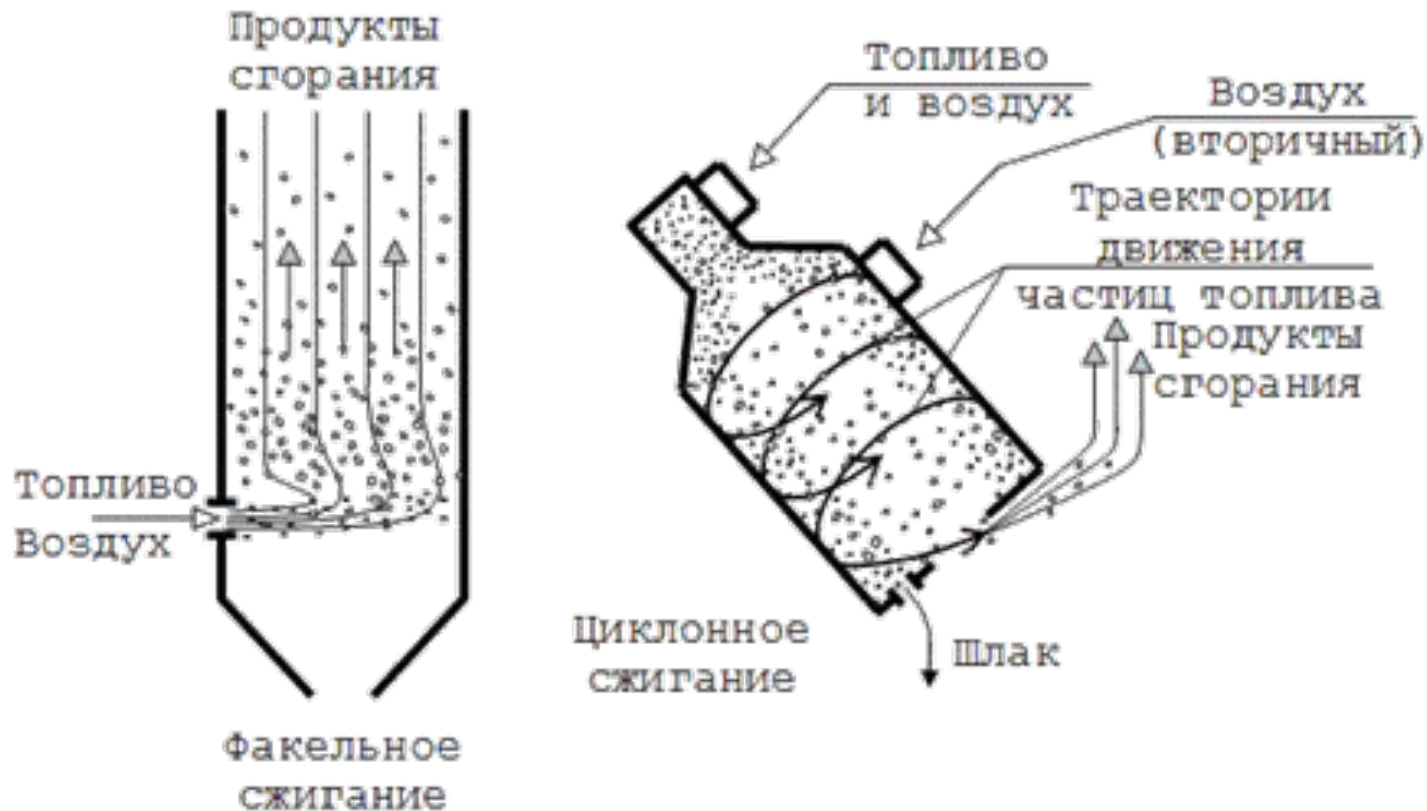
# Топливосжигающие устройства

Схемы организации топочных процессов



# Топливосжигающие устройства

Схемы организации топочных процессов



Камерные топки



# Топливосжигающие устройства

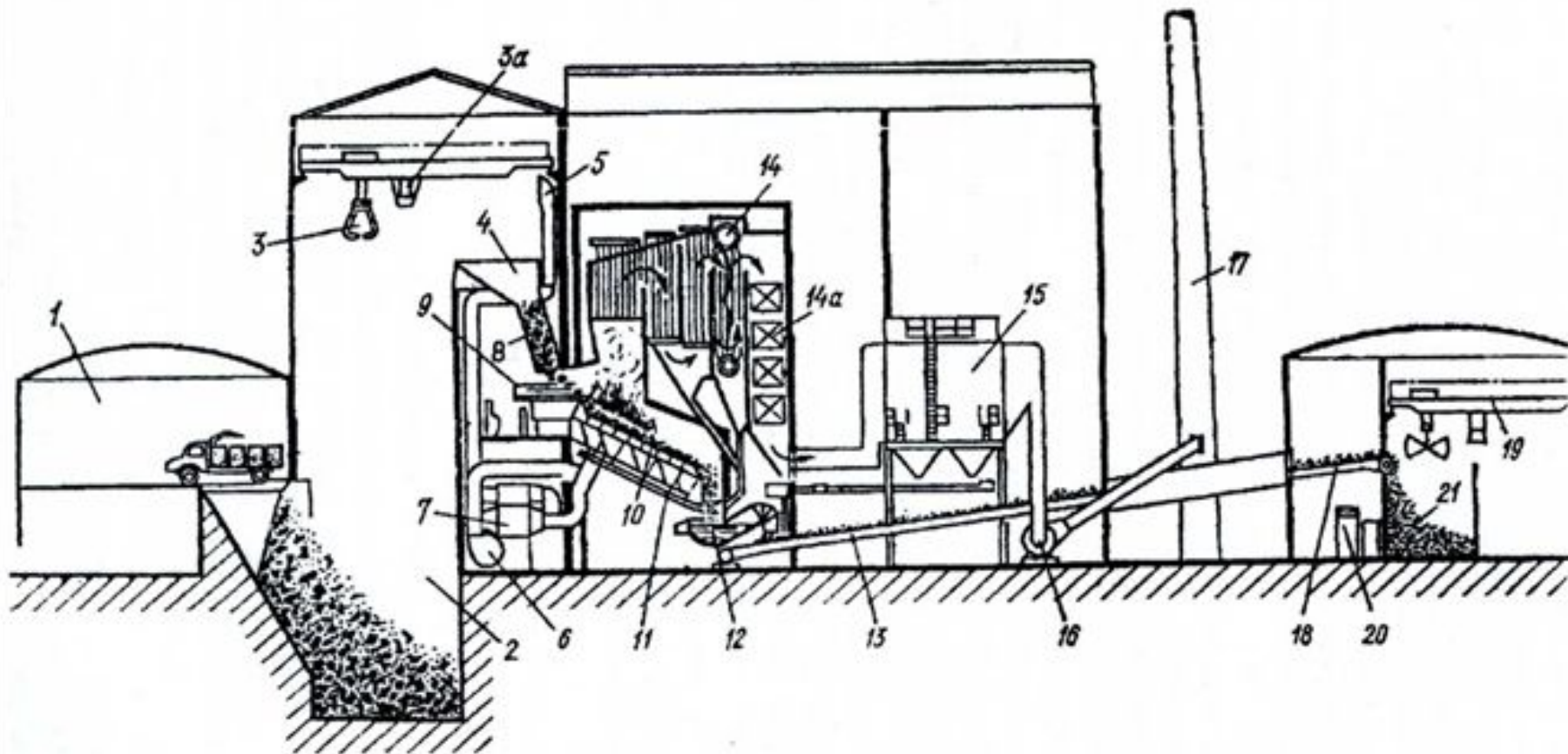
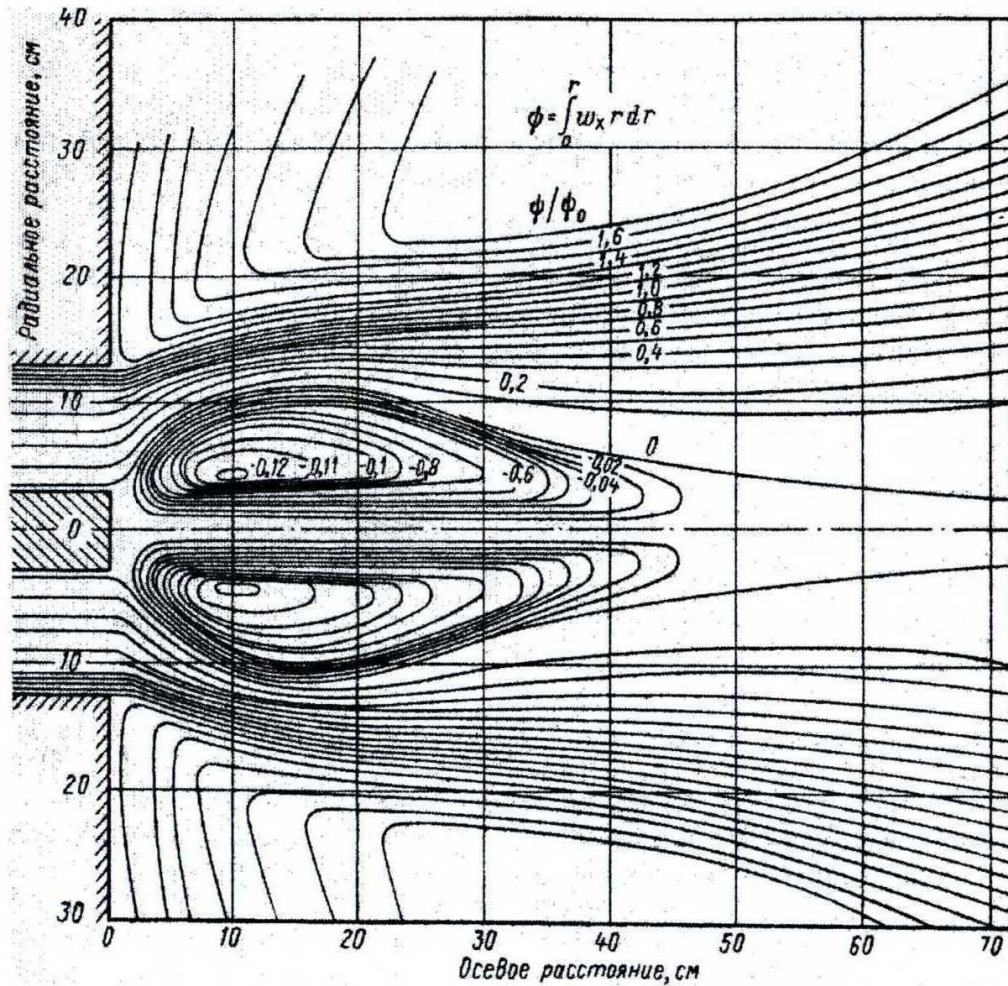


Рис. 4. Схема мусоросжигательного завода

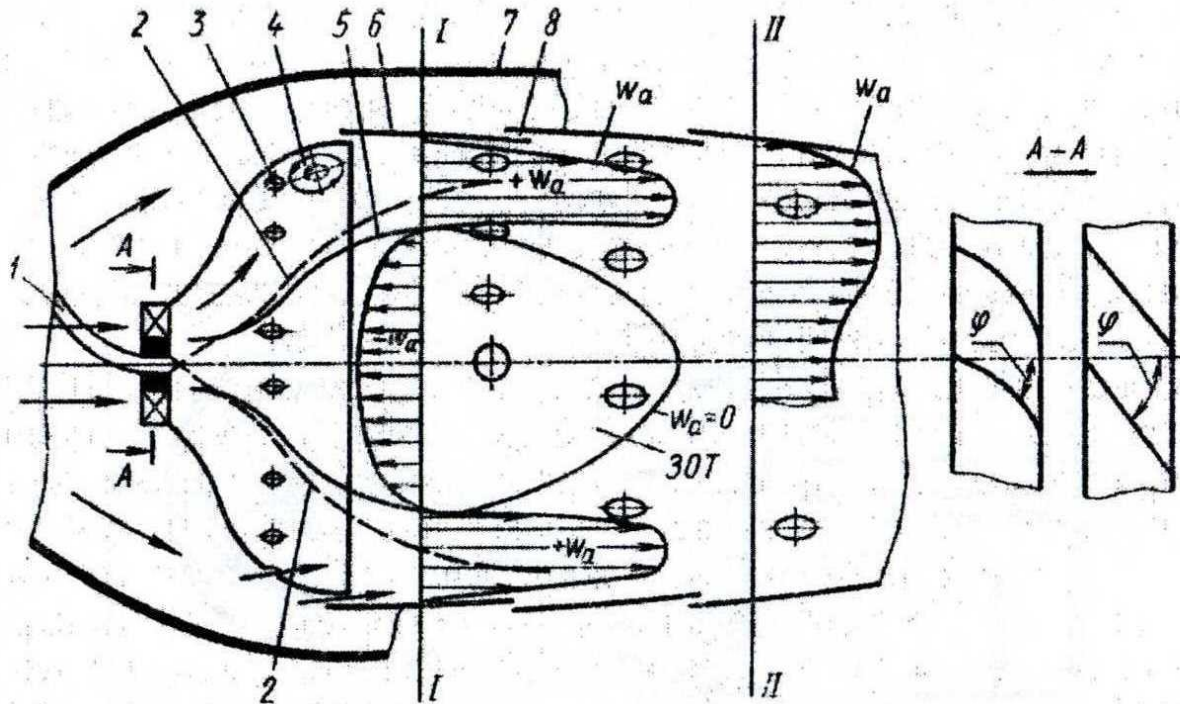
# Топливосжигающие устройства

Линии тока на начальном участке закрученной струи



# Топливосжигающие устройства

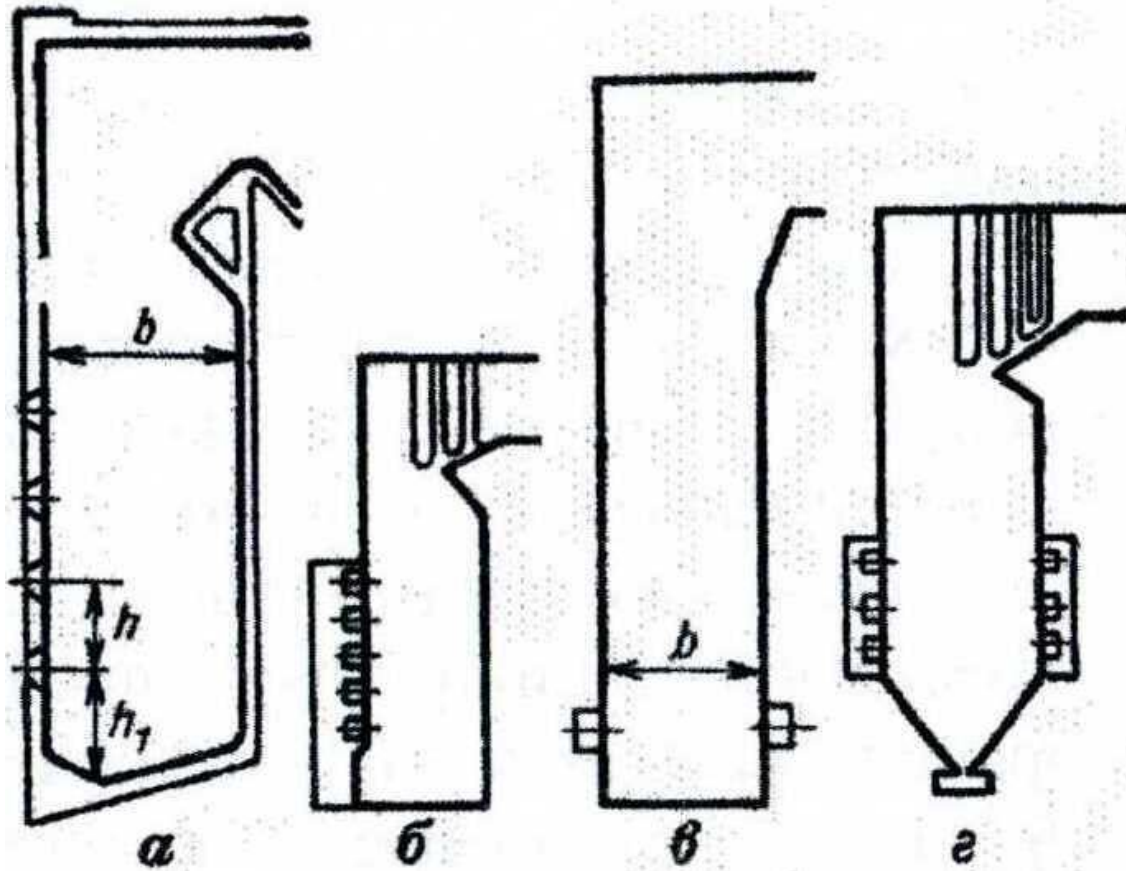
Схема организации рабочего процесса в камере сгорания авиационного газотурбинного двигателя



1 - форсунка; 2 - конус топлива; 3 - отверстия; 4 - возможная зона отрыва потока; 5 - граница зоны обратных токов; 6 - обечайка жаровой трубы; 7 - корпус; 8 - щель для охлаждающего воздуха.

# Топливосжигающие устройства

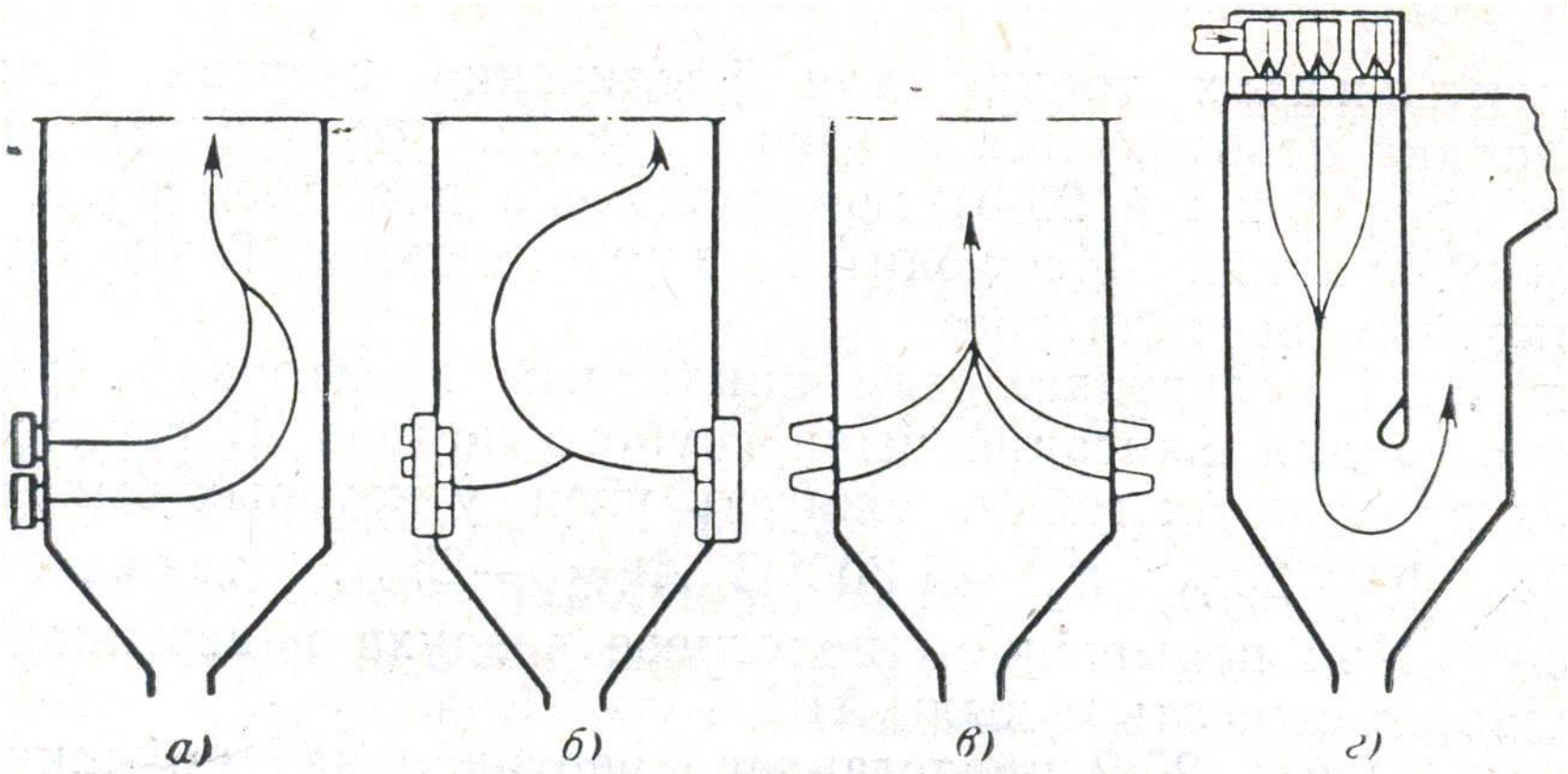
## Схемы газомазутных топочных устройств



а - фронтальное расположение горелок, индивидуальный подвод воздуха;  
б - фронтальное расположение горелок, групповой подвод воздуха;      в  
в - встречное расположение горелок, индивидуальный подвод воздуха;      г -  
г - встречное расположение горелок, групповой подвод воздуха

# Топливосжигающие устройства

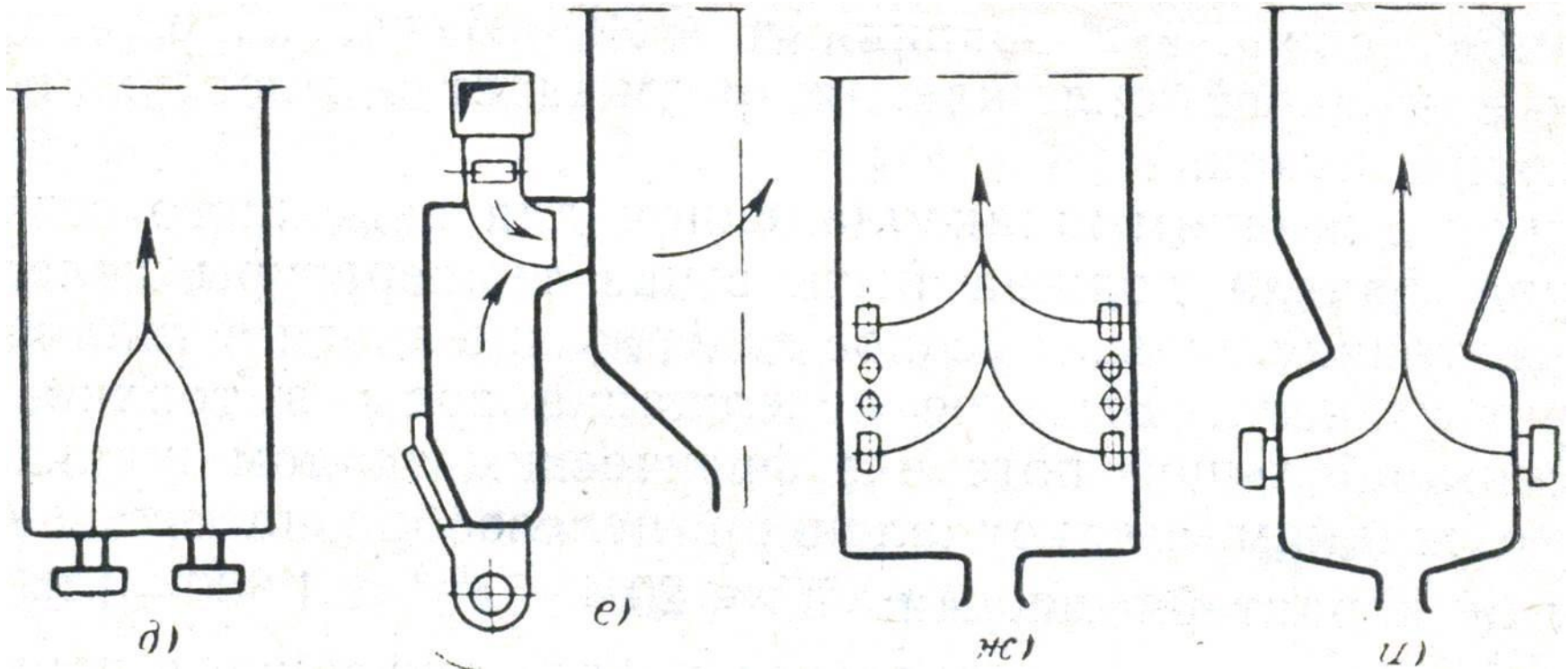
## Схемы конструкций камерных топок



- а – с фронтальным расположением горелок
- б – с угловым расположением горелок
- в – со встречной компоновкой горелок
- г – с потолочным расположением горелок

# Топливосжигающие устройства

## Схемы конструкций камерных топок



д – с подовым расположением горелок

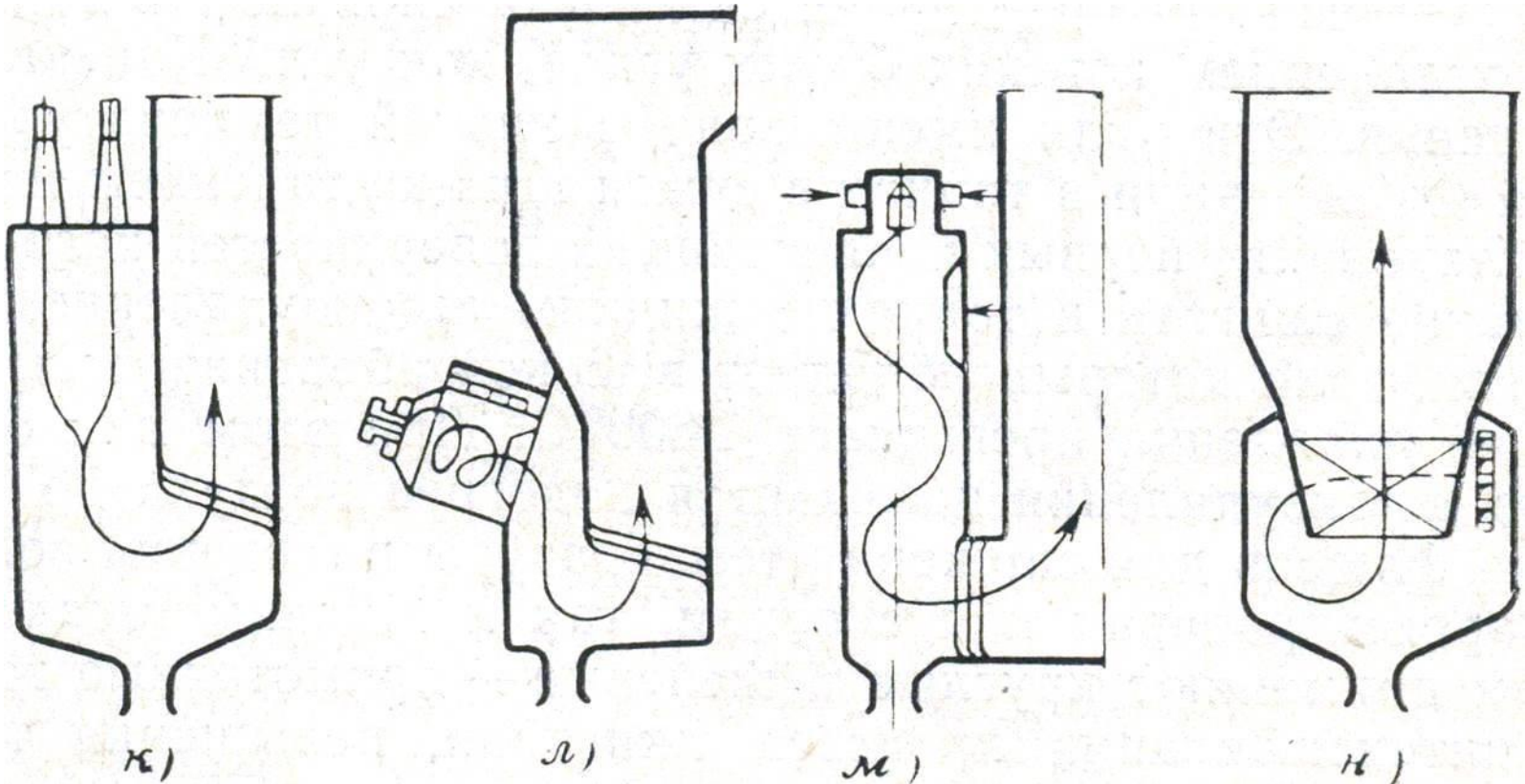
е – шахтно-мельничные топки

ж – с жидким шлакоудалением призматической формы

и – с жидким шлакоудалением и с пережимом.

# Топливосжигающие устройства

## Схемы конструкций камерных топок



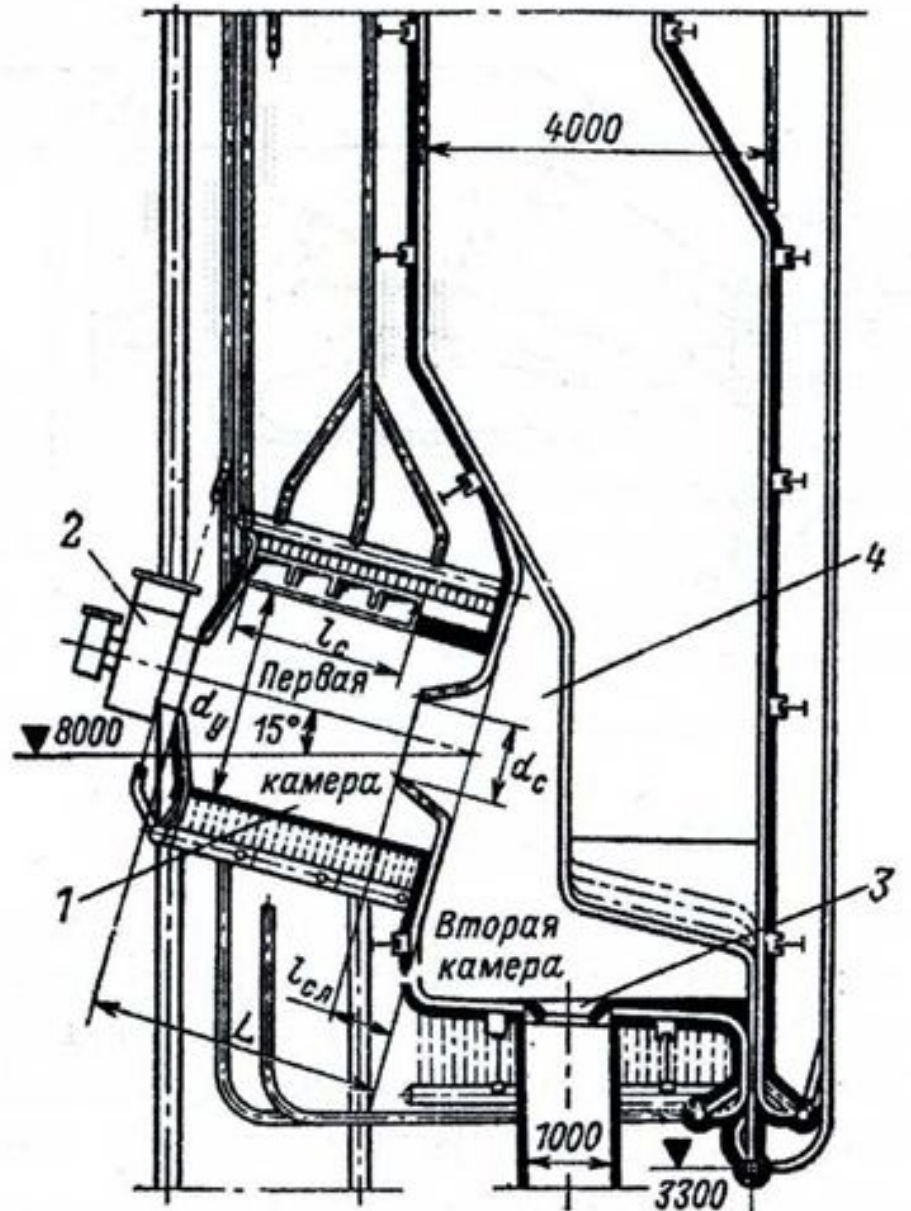
к – двухкамерная топка с жидким шлакоудалением

л – горизонтальная циклонная топка

м – топка ВТИ с вертикальным циклонным предтопком

н – вертикальная циклонная топка с пережимом,  
сконструированная в ФРГ.

# Топливосжигающие устройства



- Циклонная топка ЦКТИ  
(для пылеугольного сжигания)
- 1 - циклонная камера;
  - 2 - пылеугольная горелка;
  - 3 - летка;
  - 4 - камера дожигания).



# Топливосжигающие устройства

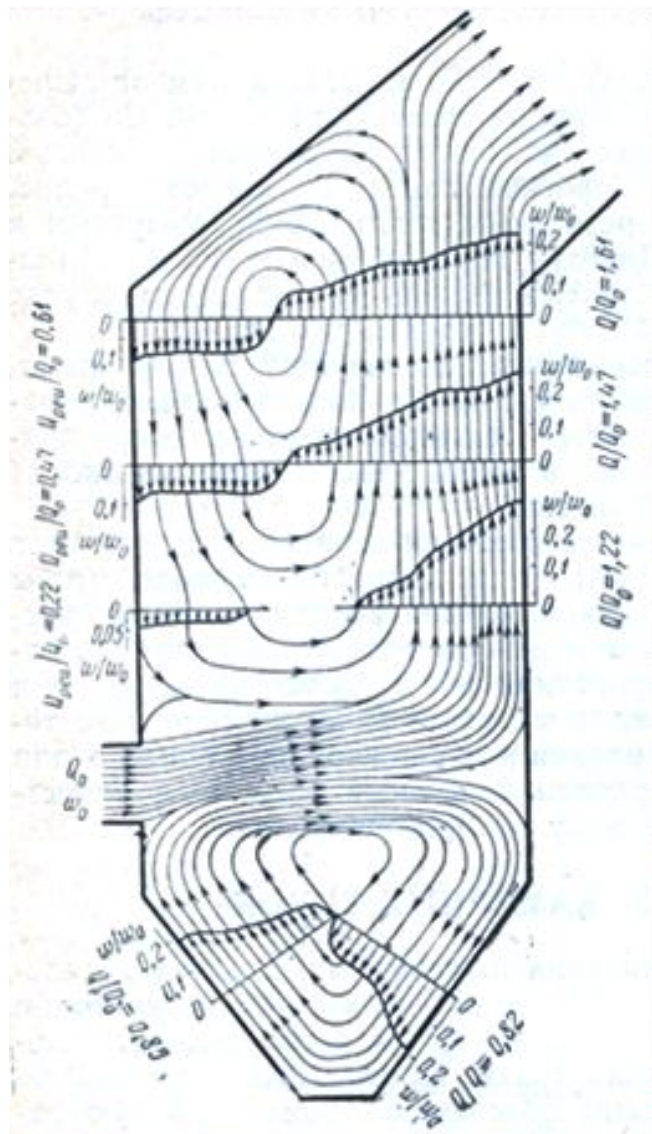


Рис. 3-3. Аэродинамика топки с фронтальными горелками.

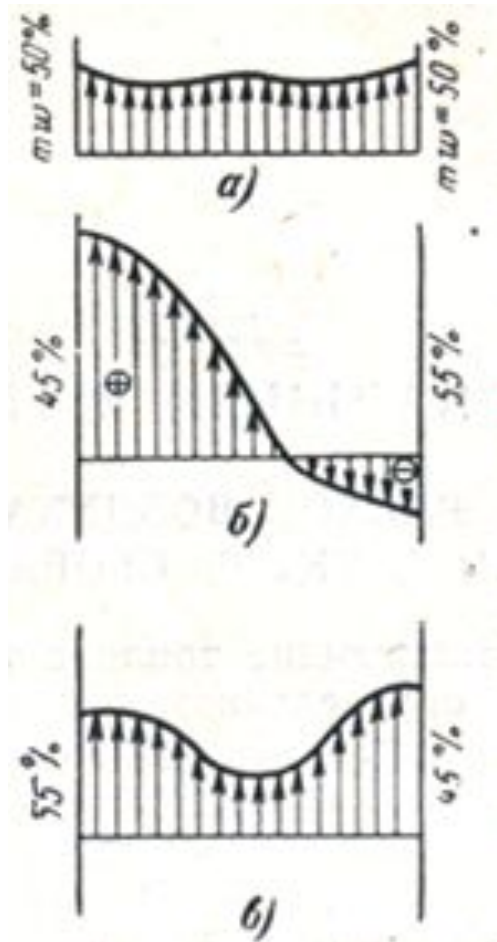


Рис. 3-4. Распределение скоростей при встречных горелках. в — количества движения встречных потоков одинаковы; б — количества движения встречных потоков разные; в — распределение скоростей при встречно-смещенном расположении горелок.