

Московский Государственный Университет Путей Сообщения
Российская Открытая Академия транспорта
Кафедра “Теплоэнергетика и водоснабжение на железнодорожном транспорте”
Кандидат технических наук, доцент Драбкина Елена Васильевна

ТОПЛИВО, ВОДОПОДГОТОВКА И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Для студентов 3 курса специальности
Специальность 140104 «ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА» (ПТ)

Материалы к лекциям

2013



**РОССИЙСКАЯ ОТКРЫТАЯ
АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА**



МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

ТОПЛИВО

- Топливо –горючие вещества, основной составной частью которых является углерод, применяемые для получения при их сжигании тепловой энергии.

- По физическому состоянию топливо подразделяют на твердое, жидкое и газообразное.
- Топливо, которое встречается в природных условиях в состоянии, пригодном для промышленного использования, называется **природным**.
- Топливо, получаемое при переработке природного топлива, называют **искусственным**.

Твердое	Жидкое	Газообразное
<i>Естественное</i>		
Древесина, торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит	Нефть	Природный газ
<i>Искусственное</i>		
Брикеты, кокс	Моторные топлива	Генераторный газ
<i>Отходы</i>		
Отходы углерода	Мазут	Доменный и коксовый газы

СОСТАВ ТОПЛИВА

- В состав топлива входят в виде сложных химических соединений, углерод С, Водород Н, кислород О, азот N и сера S.
- Кроме того, топливо содержит воду W и минеральные примеси A.
- В состав газообразного топлива входят окись углерода CO, метан CH_4 , сероводород H_2S и углеводороды типа C_nH_{2m} .

- Элементарный состав топлива может быть задан рабочей, сухой или органической массами.
- Элементарный состав топлива задается в процентах по массе и может быть представлен в следующих равенствах:
 - рабочая масса:
- $C_p + H_p + O_p + N_p + S_p + A_p + W_p = 100 \%$.

- сухая масса:

- $C_c + H_c + O_c + N_c + S_c + A_c = 100 \%$.

- горючая масса:

- $C_g + H_g + O_g + N_g + S_g = 100 \%$.

- органическая масса:

- $C_o + H_o + O_o + N_o = 100 \%$.

- При этом: $S_p = S_{pл} + S_{pм} -$
- содержание в топливе серы, летучей серы и минеральной серы.

- Элементарный состав различных топлив приводится в справочных таблицах.
- Пересчет топлива с одной массы на другую производится по формулам, приведенных в таблице.

Заданная масса топлива	Множители для пересчета на искомую массу топлива			
	Рабочую	Сухую	Горючую	Органиче скую
Рабочая	1	$100 / (100 - W^p)$	$100 / (100 - A^p - W^p)$	$100 / (100 - S^p - A^p - W^p)$
Сухая	$(100 - W^p) / 100$	1	$100 / (100 - A^c)$	$100 / (100 - S^c - A^c)$
Горючая	$(100 - A^p - W^p) / 100$	$(100 - A^c) / 100$	1	$100 / (100 - S^r)$
Органиче ская	$(100 - S^p - A^p - W^p) / 100$	$(100 - S^c - A^c) / 100$	$(100 - S^r) / 100$	1

- Химический состав газообразного топлива задается в процентах по объему.
- Все расчеты, связанные с определением состава газообразного топлива, производятся для 1 м^3 сухого газа при нормальных условиях.
- Содержание водяных паров и других примесей (пыли, смол) задается в г/м^3 сухого газа.

- Важнейшей составной частью топлива является углерод.
- При полном сгорании 1 кг углерода выделяется 34100 кДж тепла.
- Чем выше содержание углерода в топливе, тем больше тепла выделится при его сжигании. При химической переработке топлива углерод входит в состав образующихся при этом органических соединений. другой основной частью топлива является водород.

- Кислород и азот относятся к негорючей массе топлива (к балласту).
- Сера содержится в топливе в виде колчеданной серы и в виде сульфатов. Количество горючей смеси определяется как разность между общим содержанием серы в топливе и количеством сульфатной серы.
- Чем больше влаги в топливе, тем меньше горючая часть в единице массы.

- Негорючие минеральные примеси также являются балластом топлива.
- Твердый негорючий продукт полного окисления и разложения всех минеральных примесей топлива называют золой. Зола после разложения и плавления превращается в сплавленную массу, называемую шлаком.

- Важным показателем качества топлива является выход летучих веществ и характеристика кокса.
- В состав летучих веществ, которые выделяются из топлива при нагревании, входят газы — окись углерода, углеводороды, азот, кислород, углекислый газ и др.

- Выход летучих веществ определяется в процентах к безводной и беззольной (горючей) массам топлива:

- $V_{\text{г}} = V_{\text{а}} (100 / (100 - A_{\text{а}} - W_{\text{а}}))$,

- где $V_{\text{а}}$, $A_{\text{а}}$, $W_{\text{а}}$ – выход летучих веществ, содержание золы и влаги в топливе на аналитическую пробу в процентах.
- Чем больше выход летучих веществ, тем легче загорается топливо, выход летучих веществ положен в основу классификации твердого топлива.

ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

- Теплотой сгорания топлива называют количество тепла, которое выделяется при полном сгорании 1 кг твердого (жидкого) или 1 м³ газообразного топлива.
- На практике теплоту сгорания топлива определяют методом калометрирования.
- В закрытом сосуде сжигают определенное количество топлива. Теплота сгоревшего топлива через стенки сосуда передается воде.
- Зная это количество воды, окружающей сосуд, теплоемкость сосуда и разность температур воды до и после опыта, определяют теплоту сгорания топлива.

- Различают высшую $Q_{\text{В}}$ и низшую $Q_{\text{Н}}$ теплоту сгорания топлива.
- Теплота сгорания высшая больше, чем теплота сгорания низшая на количество теплоты, которое затрачивается на испарение влаги рабочей массы топлива и влаги, получаемой при сгорании водорода, входящего в состав топлива.
- Соотношение между теплотой сгорания высшей и низшей в кДж/кг:

$$Q_{\text{рН}} = Q_{\text{рВ}} - 224H_{\text{р}} - 25W_{\text{р}}$$

- В практических расчетах пользуются теплотой сгорания низшей на рабочую массу топлива $Q_{рв}$.
- Теплоту сгорания топлива приблизительно можно определить по эмпирическим формулам:
 - для твердого и жидкого топлива:
 - $Q_{рн} = 338C_p + 1025H_p + 108,5(O_p - S_{рл}) - 25 W_p$.
 - для газообразного топлива:
 - $Q_{рн} = 108H_2 - 126CO + 234H_2S + 358 CH_4 + 638 C_2H_6 + 913 C_3H_8 + 1187 C_4H_{10} + 1461 C_5H_{12} + 591 C_2H_4 + 860 C_3H_6 + 1135 C_4H_8$.
 - где H_2 , CO и т.д. – содержание газов в смеси в процентах по объему при нормальных условиях.

- Для удобства расчетов и сравнения теплоты сгорания различных видов топлива пользуются понятием *условное топливо*. Теплота сгорания условного топлива составляет 29,3 МДж/кг (7000 ккал/кг).
- Для пересчета расходов натурального топлива на условное служит тепловой эквивалент топлива:
 - $V_u = V_r \text{Э}$
- где V_u и V_r – расходы условного и рабочего (натурального) топлива;
- Э – тепловой эквивалент топлива.

- $\mathcal{E} = Q_{рн} / 7000$, если $Q_{рн}$ ккал/кг;
- $\mathcal{E} = Q_{рн} / 29,3$, если $Q_{рн}$ МДж/кг;
- Иногда применяют смеси топлив (твердых, твердых с жидкими, горючими отходами и с газообразным топливом). Теплота сгорания смеси твердых топлив или твердого и жидкого характеризуется теплотой сгорания и массовыми долями каждого компонента смеси:
 - $Q_{рн см} = g' Q_{р'н} + (1 - g') Q_{р''н}$.
- где g' – массовая доля одного из компонентов смеси; $Q_{р'н}$ и $Q_{р''н}$ – теплота сгорания первого и второго топлив.

- Для смеси твердого или жидкого топлива с газообразным:
 - $Q_{рн см} = Q_{р'н} + k Q_{р''н}$.
- где k – количество газа, приходящегося на 1 кг твердого или жидкого топлива, $м^3/кг$.
- Теплота сгорания смеси в этом случае имеет размерность ккал/ кг или кДж/ кг.

- К древесному топливу относятся дрова и отходы деревообрабатывающих предприятий (опилки, обрезки, щепы и т.д.). Заготовку дров производят из неделовой древесины. Теплота сгорания древесины в кДж/ кг:
 - $Q_{рн} = 18300 - 210W_p$
 - для сплавных дров:
 - $Q_{рн} = 16200 - 190W_p$
- Основными признаками классификации дров является порода и влажность, сухие $W_p \leq 25 \%$, полусухие $W_p = 25 - 30 \%$, сырые - $W_p > 35 \%$.

- Торф – продукт неполного разложения растений при недостатке воздуха и большой влажности.
- В зависимости от способа добычи различают кусковой торф в виде кирпичей и фрезерный – в виде крошки.
- Торф отличается большим содержанием влаги до 50 % и высокой зольностью.
- Теплота сгорания торфа – сырца – 8,3 – 10,5 МДж/кг.

- Бурый уголь состоит из горючих веществ растительного происхождения и является следующей стадией обуглероживания за торфом. Бурые угли отличаются высоким содержанием влаги и золы.
- Теплота сгорания равна – 6,2 – 18,5 МДж/кг.
- Торф и бурые угли относятся к местным видам топлива.
- В зависимости от химического состава и назначения каменные угли подразделяют на длиннопламенный (Д), газовый (Г), жирный (Ж), тощий (Т) и др.

- Теплота сгорания каменных углей – 17,5 – 28,6 МДж/кг.
- Антрацит представляет собой наиболее обуглероженную разновидность каменного угля.
- Теплота сгорания каменных углей – 20,9 – 27,2 МДж/кг.
- Антрациты маркируются буквой А, к которой добавляют буквы, обозначающие размеры кусков: плита (АП), крупный (АК), мелкий (АМ), семечко (АС), штыб (АШ) и т.д. Марка несортированного угля имеет букву Р.

- Жидкое топливо получается главным образом путем переработки нефти.
- Из нефти получают керосин, бензин, смазочные масла и др.
- Керосин и бензин используются в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания (ДВС).
- Остаточный продукт переработки нефти – мазут – применяется как топливо в промышленных печах и в топках паровых котлов.
- Теплота сгорания мазута 40 МДж/кг.

- Газообразное топливо представляет собой смесь различных газов.
- Природные газы содержат от 80 до 98 % метана. Попутные газы, выходящие на поверхность нефтяных скважин одновременно с добываемой нефтью, состоят из метана (4- 60 %) и тяжелых углеводородов.
- Теплота сгорания природного газа 33,5 – 35,6 МДж/м³.
- Из искусственных газов наибольшее распространение получили генераторный газ (теплота сгорания 5,9 – 10,5 МДж/м³), коксовый (16,7МДж/м³) и доменный (3,77 МДж/м³).

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

- Горение топлива представляет собой химический процесс соединения горючих веществ топлива с кислородом воздуха, сопровождающийся интенсивным выделением теплоты.
- Процессы горения подразделяют на гомогенные и гетерогенные. Если топливо и окислитель (кислород) находятся в газообразном состоянии и образуют гомогенную смесь, то горение протекает в объеме и называется гомогенным. При гетерогенном горении топливо и окислитель находятся в различных агрегатных состояниях, реакции протекают на поверхности раздела фаз: твердой, жидкой и газообразной.

- Процесс горения топлива условно можно разделить на две стадии: воспламенение и последующее горение.
- При нагревании топлива происходит повышение температуры.
- При достижении определенной для каждого топлива температуры (температуры воспламенения) топливо воспламеняется, после чего начинается *процесс устойчивого горения*.

- Горение называется полным, если оно происходит при достаточном количестве окислителя и завершается полным окислением горючих элементов топлива.
- Продукты сгорания при этом состоят из CO_2 , SO_2 , водяного пара H_2O и N_2 .
- При недостаточном количестве окислителя происходит неполное сгорание и в продуктах сгорания содержится CO .

РАСХОД ВОЗДУХА

- Теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания топлива, определяется по формулам горения составных элементов топлива.
- Так, для сгорания 1 кг углерода необходимо $32/12 = 8/3 = 2,67$ кг кислорода, так как реакция горения углерода протекает следующим образом:
 - $12 \text{ кг С} + 32 \text{ кг О}_2 = 44 \text{ кг СО}_2$

- Для 1 кг водорода требуется 8 кг кислорода:
 - $4 \text{ кг } \text{H}_2 + 32 \text{ кг } \text{O}_2 = 36 \text{ кг } \text{H}_2\text{O}, \quad (32 / 4 = 8)$
- для сгорания 1 кг серы – 1 кг кислорода:
 - $32 \text{ кг } \text{S} + 32 \text{ кг } \text{O}_2 = 64 \text{ кг } \text{SO}_2$
- Таким образом, количество кислорода (в кг), необходимое для полного сгорания 1 кг топлива, составит:

$$\frac{8C^p}{3} \cdot 100 + \frac{8H^p}{100} + \frac{S_l^p}{100} - \frac{O^p}{100}$$

- Так как, что массовая доля содержания кислорода в воздухе равна 0,232, то теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг твердого и жидкого топлива при нормальных условиях (в кг воздуха на кг топлива)

$$L_T = \frac{2,67C^p + 8H^p + S_l^p - O^p}{100 \cdot 0,232}$$

- Так как при нормальных условиях плотность воздуха равна $1,293 \text{ кг/м}^3$, то объемный расход воздуха V_T для сгорания 1 кг топлива:

$$V_T = \frac{L_T}{1,293}$$

- ИЛИ

$$V_T = 0,089C^p + 0,266H^p + 0,033(S_l^p - O^p)$$

- где C_p , H_p , S_{pl} , O_p – элементарный состав топлива на рабочую массу, %.
- Для газообразного топлива теоретически необходимое количество воздуха (m^3) для сгорания $1m^3$ сухого газа:

$$V_{\Gamma} = 0,0478 \left[0,5CO^T + 0,5H_2^T + 1,5H_2S^T + \right. \\ \left. + 2CH_4^T + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n^T - O_2^T \right]$$

- где CO_t , H_2 и т.д. – содержание отдельных газов в газообразном топливе в процентах по объему.
- В выражении $\Sigma(m+n/4)$ коэффициенты m и n принимаются равными значениям индексов тех газов, перед которыми стоят эти коэффициенты.
- Практически при горении часть кислорода воздуха не участвует в химических реакциях, поэтому для полного сгорания топлива подводят воздуха больше, чем необходимо теоретически.

- Отношение действительного количества воздуха (V_d), подводимого в процессе горения, к теоретически необходимому количеству (V_o), называется коэффициентом избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{V_d}{V_o}$$

- В эксплуатационных условиях коэффициент избытка воздуха ориентировочно может быть оценен по содержанию кислорода в продуктах сгорания топлива:

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2}$$

СОСТАВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

- Условно считают, что продукты сгорания топлива (в $\text{м}^3/\text{кг}$)
 - $V_{\Gamma} = V_{\text{сг}} + V_{\text{вп}}$
- где $V_{\text{сг}}$ и $V_{\text{вп}}$ – объем сухих газов и водяных паров соответственно.
- Объем сухих газов:
 - $V_{\text{сг}} = V_{\text{RO}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}$
- где $\text{RO}_2 = \text{CO}_2 + \text{SO}_2$

- При $\alpha = 1$ объем сухих газов минимальный,
т.е. $V_d = V_T$.
- Если $\alpha > 1$, то
 - $V_{сг} = V_{сг}^{\min} + (\alpha - 1) V_T$.
 - $V_{сг}^{\min} = 0,79 V_T + 0,0187 K^p$.
- где $0,79 V_T$ – объем азота в теоретически необходимом количестве воздуха;
- K^p – объем трехатомных газов
 - $K^p = C_p + 0,375 S^p_{л}$.
- ИЛИ

- Объем водяных паров при нормальных условиях ($\rho = 0,805 \text{ кг/м}^3$)

$$V_{ВП} = \frac{9H^p + W^p}{100 \cdot 0,805}$$

- Или

$$V_{ВП} = 0,124(9H^p + W^p)$$

- При $\alpha = 1$
- $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{min}} = 0,01(\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 0,124d_{\text{Г}} + \text{C}_2\text{H}_4) + 0,0161V_{\text{Г}}$
- где $d_{\text{Г}}$ – влагосодержание газообразного топлива.
- При $\alpha > 1$
- $V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{min}} + 0,0161(\alpha - 1)V_{\text{Т}}$

- Объем сухих газов при $\alpha > 1$:
 - $V_{\text{сг}} = V_{\text{сг}}^{\text{min}} + (\alpha - 1)V_{\text{T}}$
 - $V_{\text{сг}}^{\text{min}} = V_{\text{RO2}} + V_{\text{N2}}^{\text{min}}$
 - $V_{\text{N2}}^{\text{min}} = 0,79V_{\text{T}} + N_2/100$
- При атмосферном давлении с учетом температуры газов объем продуктов сгорания
 - $V_{\text{гт}} = V_{\text{г}} (1+t/273)$
- Состав продуктов сгорания определяется с помощью газоанализаторов.

ВОДОПОДГОТОВКА

- Вода является в настоящее время основным рабочим телом и теплоносителем в теплоэнергетике.

Но её использование связано с рядом затруднений, возникающих из-за содержания в воде различных веществ, способных нарушать нормальную работу котлов и тепловых сетей.

Основные определения

- Количество вещества, содержащегося в определенном объеме или массе раствора (в данном случае – воды), называется **концентрацией раствора**.
- Концентрация раствора может быть выражена в массовых процентах:

$$C_{МП} = \frac{g}{V_P \rho_P} \cdot 100(\%)$$

- где: g – массовое количество вещества, растворенное в растворе, кг;
- V_p – объем раствора, m^3 ;
- ρ – плотность раствора,
- **Объемная концентрация**
- C_{OK} , кг/ m^3 характеризует количество кг (г, мг) вещества, содержащихся в m^3 (л) раствора.

$$C_{OK} = \frac{g}{V_p}, \frac{кг}{m^3}$$

- **Молярная концентрация** C_M показывает число килограмм - молекул данного вещества, растворенных в 1 м^3 раствора.

$$C_M = \frac{g}{V_p \cdot M} = \frac{C_{OK}}{M}, \frac{\text{кг} - \text{моль}}{\text{м}^3}$$

- где M — масса кг/моля растворенного вещества.

Так же концентрация часто выражается в кг — эквивалентах (мг-экв., мкг-экв.).

Под кг-экв понимается количество вещества, равное его эквивалентной массе, т.е.

$$\mathcal{E}_K = \frac{M}{n}$$

Где n - валентность в данной реакции

$$C_{\mathcal{E}} = \frac{g \cdot n}{V_p \cdot M} = \frac{C_{o.k}}{\mathcal{E}_K}$$

Водородный показатель

- Молекулы воды, как и многие другие вещества, диссоциируют на ионы:



- При данной температуре произведение концентраций, этих ионов, г-ион/л,

$$K_B = C^{\text{OH}^-} \cdot C^{\text{H}^+}$$

- - является величиной постоянной, которая называется ионным произведением воды. Например, при 298 К $K_B = 10^{-14}$.

- Реакция среды считается нейтральной,

- если, $C_{H^+} = C_{OH^-}$ г-ион/л.

-

- Для этого случая можно написать:

$$C_{H^+} = C_{OH^-} = \sqrt{K_v} = 10^{-7}.$$

- В кислой среде, очевидно, должно быть $C^{H^+} > 10^{-7}$, а в щелочной $C^{H^+} < 10^{-7}$.
- Для ионов OH^- , наоборот, в кислой $< 10^{-7}$, а в щелочной $> 10^{-7}$.
- Оперировать каждый раз числами с отрицательными показателями неудобно.
- Поэтому условились вместо концентрации ионов H^+ и OH^- - применять их отрицательные логарифмы.
- Отрицательный логарифм концентрации иона водорода называется водородным показателем и обозначается рН, т.е.
 - $-lgC_{H^+} = pH$.

- Выражение $pOH = -\lg C_{OH^-}$ - будет называться гидроксильным показателем.
- Следовательно, равенство после логарифмирования и умножения на -1 можно представить в таком виде:
 - $pK_w = pOH + pH = 14$ ($t = 298$ K).

Основные показатели качества воды

Щелочность

- Щелочностью воды называется общее содержание в ней веществ, обуславливающих при диссоциации или в результате гидролиза повышенную концентрацию ионов OH^- .
- В природных водах щелочность обычно обуславливается присутствием в них ионов HCO_3^- , SiO_3^{2-} , HSiO_3^- и реже CO_3^{2-} .
- (а также присутствием солей некоторых слабых органических кислот, называемых гуматами), которые в результате гидролиза связывают ионы H^+ и тем самым повышают концентрацию ионов OH^- .
- В умягченных и котловых водах, кроме перечисленных веществ, щелочность обуславливается также ионами PO_4^{3-} и OH^- .

- В зависимости от того, какой анион присутствует в воде (HCO_3^- , CO_3^{2-} или OH^-), щелочность называют соответственно:
 - бикарбонатной Щ_b ,
 - карбонатной Щ_k
 - или гидратной $\text{Щ}_г$.
- Общая щелочность воды определяется количеством затраченной на титрование кислоты с индикатором метилоранжем и, следовательно, будет обуславливаться не только ионами HCO_3^- , CO_3^{2-} и OH^- , но и другими, которые реагируют с кислотой, в том числе и гуматами.

Жесткость

- **Жесткостью воды J_0** называется сумма концентраций катионов кальция и магния, выраженная количеством миллиграмм – эквивалентов в 1 кг (мг-экв/кг).
- По жесткости и щелочности природные воды можно разделить на две группы: щелочные и не щелочные. Первые характеризуется неравенством $J_0 > Щ_0$, вторые – $J_0 < Щ_0$. В водах первой группы, которые встречаются более часто, различают
 - жесткость общую J_0 ,
 - карбонатную J_k ,
 - некарбонатную $J_{нк}$,
 - кальциевую J_{Ca} и
 - магниевую J_{Mg} .

- Между ними имеется место, следующее соотношение:
 - $J_0 = J_k + J_{нк} = J_{Ca} + J_{Mg}$. (2-1)
- Карбонатная жесткость обуславливается присутствующими в воде бикарбонатами кальция и магния; некарбонатную жесткость образуют хлориды и сульфаты кальция и магния, кальциевую жесткость составляют соединения кальция, магниевую – соединения магния.
- Для воды второй группы понятия карбонатной и некарбонатной жесткости теряют смысл, поскольку $S_{нсо} > J_0$. Для этих вод следует различать жесткость общую, кальциевую, магниевую, а также щелочность.

- При расчетах процессов умягчения воды осадителями как внутри, так и вне котельного агрегата, а также других процессов водообработки для щелочных вод условно следует принимать $J_k = J_0$ и $J_{нк} = 0$, учитывая избыточную концентрацию ионов НСО .
- Мягкие воды (химически обработанная, питательная, конденсат и т.д.) обладают лишь общей или остаточной жесткостью J_0 .
- Следует обратить внимание на то, что присутствие в воде соединений натрия не придает ей жесткости.

Сухой остаток

- **Сухим остатком воды** называется суммарное количество нелетучих веществ, присутствующих в воде в коллоидном и молекулярно-дисперсном состоянии, выраженное в мг/кг.
- Сухой остаток определяют путем выпаривания профильтрованной пробы воды и последующего высушивания сухих веществ при 383-393 К. Количество этих веществ, определенное взвешиванием и пересчитанное на 1 кг воды, и дает сухой остаток. Следовательно, в понятие сухого остатка не входят растворенные в воде газы, а также летучие (например, NH_3) и взвешенные вещества.

- При определении сухого остатка природных вод бикарбонаты кальция и магния переходят в карбонаты CaCO_3 , MgCO_3 и CO_3 .
- Помимо сухого, различают прокаленный, минеральный и сульфатный остатки.
- Если сухой остаток прокалить в течение нескольких минут при 1073K , то масса его уменьшится и получится прокаленный остаток.
- Уменьшение массы происходит за счет удаления (сгорания) органических веществ, улетучивания остатков влаги, разложения карбонатов и аналогичных процессов. Может быть и увеличение массы за счет окисления металлов.
- Величина, полученная путем суммирования всех найденных в воде анализом катионов, анионов и в том числе CO_3 , а также Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 называется минеральным остатком.

Окисляемость

- Окисляемость характеризует загрязненность воды органическими веществами, это характерно для вод болотного происхождения.
- Они окрашивают воду в желтый или коричневый цвет.
- Загрязнению воды органическими веществами способствуют процессы отмирания и распада различных обитающих в воде живых организмов, и сброс в водоемы промышленных неочищенных сточных вод.
- Не все органические вещества присутствуют в воде в коллоидном состоянии, часть из них находится в истинном растворе.

- **Все природные воды содержат газы, среди которых следует особо отметить кислород и углекислый газ, вызывающие коррозию металла.**
- **Поэтому дегазация является обязательной стадией обработки питательной воды котельных агрегатов.**
- Окисляемость обычно выражается количеством миллиграммов кислорода, потребленных для окисления в определенных условиях органических веществ, содержащихся в 1 кг исследуемой воды, и обозначается мг/кг O_2 .
- Окисляемость не отвечает содержанию в воде органических веществ, так как при условиях ее определения не происходит полного разрушения (окисления) всех органических веществ.
- Окисляемость может быть выражена также количеством мг/кг KM_nO_4 , израсходованного на окисление органических веществ.

Прозрачность

- Прозрачность выражается в сантиметрах высоты столба воды, налитой в специальный стеклянный цилиндр, сквозь который (столб) еще возможно чтение печатного шрифта (прозрачность по шрифту) или наблюдение крестообразно расположенных черных полосок толщиной в 1 мм на белом матовом кружке на дне цилиндра (прозрачность по кресту).
- Прозрачность лишь приблизительно характеризует концентрацию взвешенных веществ, которая при точных анализах должна определяться массовым методом .

ПРЕДОЧИСТКА

Осветление воды

- **Осветлением** называют процесс удаления из воды грубодисперсных и коллоидных примесей.
- Удаление грубодисперсных загрязнений может быть осуществлено осаждением и фильтрованием.
- **При осаждении** частички твердых веществ под действием силы тяжести оседают на дно резервуара, в котором осветляемая вода находится в состоянии медленного движения снизу вверх. Осаждение требует длительного времени, больших объемов резервуаров и не может обеспечить полного удаления грубодисперсных примесей. Поэтому для целей приготовления добавочной воды в условиях электростанций осаждение как самостоятельный способ осветления воды не применяется.

- **Фильтрованием** называют процесс осветления воды путем пропуска ее через пористый материал, в порах которого вода оставляет грубодисперсные примеси. Аппарат, в котором производится фильтрование, называется фильтром, а пористый материал, содержащийся в нем, - фильтрующей средой или фильтрующим материалом. Фильтры, служащие для целей осветления воды, называются осветлительными или механическими.
- Фильтрование воды происходит под воздействием разности давлений над слоем фильтрующего материала h_n и под ним h_k . При работе фильтра $\Delta h = h_n - h_k$ называется потерей напора в фильтрующем слое. Обычно Δh входит потеря напора не только в фильтрующем слое, но и в самом фильтре.

- Потеря напора в фильтрующем слое (иначе называемая сопротивлением этого слоя) зависит от скорости фильтрования, высоты фильтрующего слоя, диаметра зерен фильтрующего материала и степени заноса его загрязнениями. Увеличение численного значения этих факторов (кроме размера зерен) вызывает возрастание Δh . В процессе работы фильтра из перечисленных величин изменяется только загрязненность фильтрующего слоя, которая непрерывно возрастает. Вместе с ней возрастает и потеря напора от некоторого наименьшего
- Δh_0 соответствующего чистому слою, до максимально допустимого

- $\Delta h_{\text{макс}} = (0,8 - 1,0) * 10^5$ Па для напорных и $(0,2 - 0,3) * 10^5$ Па для открытых фильтров.
- Скорость фильтрования на осветлительных фильтрах $V_{\text{ф}}$ принимают в пределах 5-10 м/ч.
- По достижению предельного загрязнения фильтр выводится из работы и ставится на промывку. При промывке удержанные фильтрующим слоем загрязнения вымываются. Промытый фильтр вновь включается в работу. Время работы фильтра между двумя последовательными промывками T называется его рабочим периодом или фильтроциклом, но не менее 8 ч.

- Величина фильтроцикла зависит от многих факторов, среди которых необходимо отметить концентрацию взвешенных веществ в фильтруемой воде $C_{в.в}$, мг/кг, и грязеемкость фильтра $T = G_{гр} \rho_{сл} / C_{в.в} V_{ф}$.
- **Грязеемкостью** $G_{гр}$ фильтра называется количество задержанных фильтром за фильтроцикл загрязнений, отнесенное к 1 м³ фильтрующего материала и выраженное в килограммах.
- Чем выше грязеемкость при данном $C_{в.в}$, тем больше длительность фильтроцикла.

- Если через фильтр пропущено количество воды, равное Q_{ϕ} , то

$$\Gamma p = \frac{Q_{\phi} C_{в.в}}{10^3 h_{сл} f_{\phi}} \quad (2.1)$$

- где $h_{сл}$ – высота фильтрующего слоя, м;
- f_{ϕ} – площадь сечения фильтра, m^2 ;
- Q_{ϕ} – выражена в m^3 .
- В качестве фильтрующих материалов применяют дробленый антрацит (0,8-1,5 мм), кварцевый песок (0,5-1 мм) с содержанием SiO_2 не менее 96 %, керамзит (0,8-1,5 мм). Следует учитывать, что кварцевый песок растворяется в щелочной воде, обогащая профильтрованную воду (называемую часто фильтром) кремневой кислотой.

Устройство зернистых осветительных фильтров

- Существуют разные типы и конструкции осветительных фильтров. Конструктивно наиболее простым является однопоточный (однослойный) напорный фильтр I. Внутренний его объем заполнен на определенную высоту слоем фильтрующего материала, сверху которого располагается водяной объем, называемый водяной подушкой. Напорные фильтры работают под давлением, создаваемым насосами.

- В открытых фильтрах 2 фильтрование происходит под напором столба воды h в самом фильтре. Они широко используются на очистных установках питьевого водоснабжения. Изготавливаются эти фильтры из железобетона, имеют прямоугольную форму в сечении и большую поверхность фильтрования. Сравнительно малый напор h ограничивает возможность формированной их работы.
- Горизонтальные напорные фильтры 3 обладают большой поверхностью фильтрования и, следовательно, единичной производительностью. Однако они громоздки и при установке в помещении требуют большой производственной площади. Этому недостатка лишены многопоточные фильтры 5.

- Они полностью загружаются фильтрующим материалом, в котором размещаются сборно-распределительные устройства.
- Как видно из схемы, они позволяют создавать несколько (в данном случае три) потоков обрабатываемой воды и увеличить производительность во только же раз.
- Камерные фильтры 4 разделены сплошными перегородками на камеры (в данном примере на две камеры), которые соответствуют двум обычным однослойным фильтрам, работающим параллельно.

- С целью повышения скорости фильтрования, получения обработанной воды более высокого качества и увеличения грязеемкости материала в однопоточные фильтры нередко загружают два фильтрующих материала разных насыпной массы и крупности зерен, например дробленый антрацит (0,8-1,6 мм) и кварцевый песок (0,5-1,0 мм). При этом песок как более плотный материал располагается внизу. Так получают двухслойные фильтры 6, часто используемые на практике.
- В радиальном фильтре 7 фильтрующий материал загружается в кольцевой зазор, расположенный между стенкой фильтра и внутренней трубой.

- Обработанная вода подается в центральную трубу, которой и распределяется по высоте слоя материала. Фильтрация идет по радиусам окружности.
- Наиболее распространенным типом осветительного фильтра является однопоточный напорный однослойный вертикальный фильтр. Его устройство показано на рис. 4.2. Корпус фильтра, имеющий эллиптическое сечение может быть заполнено бетоном или фильтрующим материалом 2. Последний загружается слоем 1 м, считая от нижнего распределительного устройства 4.

- В верхней части фильтра укреплены дырчатое распределительное устройство 1 и воздушная трубка 7. Имеющиеся два люка 5 и 6 предназначены для осмотра и ремонта фильтра.
- На рис. 4-3 приведена схема трубопроводов фронта фильтра. Обработываемая вода подается в фильтр через задвижку 1, проходит слой материала 2 сверху вниз и выходит осветленная (фильтрат) через задвижку 7. Промывочная вода подается через задвижку 5 снизу, а удаляется через задвижку 8 в канализацию вместе с вымытыми загрязнениями. Задвижка 6 служит для сброса воды в дренаж, сжатый воздух подводится через патрубков 4. Задвижка 3 служит для выгрузки материала.

- Наиболее ответственным элементом фильтра является сборно-распределительное устройство 9, предназначенное для равномерного распределения воды по сечению фильтра, а также для предотвращения выноса материала из фильтра.
- В настоящее время имеются две конструкции этого устройства. Фильтры диаметром до 1400 мм включительно оснащаются распределительным устройством типа "ложное дно" (рис. 4-4). Внизу фильтр имеет фланцевый разъем 1 (для фильтров диаметром 1 м). Между фланцами зажимается круглая прочная пластина 3 с отверстиями, изготовленная из полимерного материала. В отверстиях закрепляются щелевые колпачки 2.

- Фильтр диаметром с 2 до 3,4 оборудуются трубчатым распределительным устройством. Оно состоит (рис. 4-5) из коллектора 1, к которому присоединяются распределяющие трубы (лучи) 5. На них имеются отверстия 3, прикрытые желобком 4, прикрепленным к трубе 5 точечной сваркой и имеющим по всей длине щели 0,4 мм. Уголки 7 жестко закрепляются в нижнем днище. К ним с помощью серьги 6, приваренной к лучу и болта 8 крепятся трубы 5. При завинчивании гайки болта конус луча 2 прижимается к коллектору, чем и создается необходимая плотность и жесткость крепления.
- В механических фильтрах лучи устанавливаются желобками вниз.
- трубчатое распределительное устройство, оснащенное колпачками 2, закрепленными на штуцере 3, приваренном к распределительной трубе 1

Эксплуатация осветительных фильтров

- Работа фильтра состоит из двух периодов: фильтрования воды (рабочего) и промывки фильтра (простоя).
- Эксплуатация фильтра в первый период состоит в наблюдении за степенью осветления воды, характеризуемой прозрачностью, нагрузкой фильтра и потерей напора (сопротивлением фильтра). Для этого фильтр оснащается расходомером осветленной воды и двумя манометрами, подключенными к линиям осветляемой и осветленной воды.

- Фильтр выводится из работы и ставится на промывку, если потеря напора достигла заданного предела или в случае ухудшения осветления воды.
- Совпадение этих двух показателей необходимости вывода фильтра на промывку наблюдается редко.
- Остановка фильтра осуществляется закрытием задвижек 1 и 7 (см. рис. 4-3).
- Промывка фильтра осуществляется пропуском через него воды обратным током, т.е. снизу вверх.
- Для этого открывают задвижку 5, затем плавно открывают задвижку 8 на столько оборотов, чтобы скорость воды в фильтре была достаточной для вымывания загрязнений.

- Эта скорость характеризуется интенсивность промывки $i_{\text{пр}}$ л/(м²с), показывающей количество литров воды, проходящее в 1 с через 1 м² площади фильтра.
- Значение $i_{\text{пр}}$ зависит от рода материала, крупности его частиц и расхода промывочной воды.
- Для кварцевого песка $i_{\text{пр}} = 12 \div 15$ дробленого антрацита 7-8 л/(м²с).
- Если интенсивность промывки слишком велика, возможен вынос фильтрующего материала водой в канализацию;
- при малом ее значении фильтр будет промыт неудовлетворительно.

- При промывке обратным током фильтрующий материал расширяется, занимая большой объем; возникает движение зерен материала в восходящем потоке воды, что способствует лучшему вымыванию загрязнений.
- Для повышения эффективности промывки в фильтр часто подают сжатый воздух через штуцер 4 в течение 3-5 мин с интенсивностью около 15-20 для кварцевого песка и 10-15 л/(м²с) для антрацита.
- После пропуска воды через фильтр, на что затрачивается в нормальном случае 6-10 мин, задвижки 5 и 8 закрываются и открывают задвижки 1 и 6.

- Несколько минут фильтр работает в дренаж с целью удаления первых минут порций воды. Эта операция является необязательной, если первый фильтрат достаточно прозрачен. Как только фильтрат станет прозрачным, задвижку 6 закрывают и фильтр включают в сеть открытием задвижки 7.
- Производительность одного фильтра, $\text{м}^3/\text{ч}$, определяется по формуле
 - $q_{\text{м.ф}} = V_{\text{ф}} f_{\text{ф}} \quad (3.2)$

- Производительность фильтровальной установки, состоящей из n фильтров, может быть выражена количеством поданной на фильтры осветляемой воды (производительность брутто $Q_{бр}$) или полезно используемой осветленной воды, полученной от установки (нетто $Q_{нт}$).
- Величина $\Delta Q = Q_{бр} - Q_{нт}$ характеризует расход воды на собственные нужды установки.
- На действующих установках $Q_{бр}$ и $Q_{нт}$ определяется по показаниям расходомеров.
- При проектировании $Q_{нт}$ может быть определена по формуле

-
- $$Q_{HT} = T\phi V\phi fa = \frac{24 - n_{м.ф} \tau_{м.ф}}{24}$$

- где $n_{м.ф}$ – количество промывок каждого фильтра в сутки;

- $\tau_{м.ф}$ - время простоя фильтра на промывке, ч.

- Расход воды, m^3 , на одну промывку фильтра

-
- $$q_{мф} = \frac{3,6i_{пр} f_{ф} t_{ф}}{60}$$

- откуда

- $$\Delta Q = \frac{q_{м.ф} m_{ф} n_{м.ф}}{24}$$

- где $t_{ф}$ – длительность промывки (6-10 мин).

КОАГУЛЯЦИЯ ВОДЫ

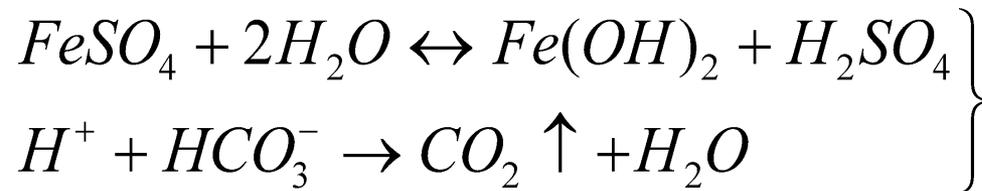
Сущность процесса

- Коагуляцией называется процесс укрупнения (слипания, свертывания) коллоидных частиц, завершающийся выпадением вещества в осадок, удаляемый осаждением или фильтрованием.
- Процесс, противоположный коагуляции, т.е. переход твердого вещества (например, осадка) в коллоидное состояние, называется пептизацией.
- В технологии водоподготовки под коагуляцией понимают обработку воды специальными реагентами с целью удаления из нее коллоидных и грубодисперсных примесей.

- Коллоидные растворы отличаются высокой устойчивостью. Это значит, что коллоидные частички не способны к самопроизвольному соединению в крупные образования и выпадению из раствора, если отсутствуют побудители такого процесса.
- Причина этого заключается в том, что коллоидные частицы данного вещества несут одноименный электрический заряд, препятствующий их соединению.
- Наиболее эффективным способом удаления этих зарядов является взаимная коагуляция коллоидов, частицы которых несут разноименные заряды. Реагенты, способные при введении в воду вызывать коагуляцию природных коллоидов, называются коагулянтами.

- Спустя некоторое время после ввода в пробу определенной дозы коагулянта происходит помутнение воды.
- С течением времени мутность усиливается, постепенно образуются крупные рыхлые хлопья, оседающие на дно сосуда и увлекающие с собой все загрязнения.
- Следовательно, видимым эффектом коагуляции является образование осадка в виде рыхлых студнеобразных хлопьев, падающих на дно сосуда.
- Если это не наблюдается, коагуляция отсутствует.
- В практике водоприготовления в качестве коагулянтов применяются сернокислое железо закисное ($\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$), сернокислый алюминий [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$], хлорное железо (FeCl_3), которые вводятся в виде растворов концентрацией 5-10 %.

- При введении в воду, например, сернокислого алюминия вначале происходит его гидролиз.
- $Al_2(SO_4)_3 + 6H_2O \leftrightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2SO_4$
- Образующая кислота нейтрализует щелочность воды
- Если вместо $Al_2(SO_4)_3$ в воду вводится сернокислое железо, эти процессы также будут иметь место:



- Коагулирующим действием обладает не $\text{Fe}(\text{OH})_2$, а гидрат окиси железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Следовательно, при применении в качестве коагулянта двухвалентного железа необходимо обеспечить окисление его в трехвалентное растворенным в воде кислородом
 - $2 \text{Fe}(\text{OH})_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}(\text{OH})_3$
- которое в щелочной протекает сравнительно легко.
- Приведенные реакции показывают, что при коагуляции щелочность воды понижается, а концентрация в ней свободной углекислоты возрастает.

- Ввиду этого коагулируемая вода должна обладать некоторыми минимумом щелочности, мг-ЭКВ/кг, определяемым выражением
 - $$\text{Щ}_{\text{мин}} = \text{K}_{\text{кг}} + 0,4$$
- где $\text{K}_{\text{кг}}$ – доза коагулянта, мг-ЭКВ/л.
- Если фактическая щелочность обрабатываемой воды $\text{Щ}_0 < \text{Щ}_{\text{мин}}$,
- необходимо вводить в нее щелочность (NaOH, Na_2CO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$) в количестве
 - $$\text{Щ}_{\text{кг}} = \text{d}_{\text{кг}} + 0,4 - \text{Щ}_0$$

- Результатом коагуляции воды являются увеличение ее прозрачности и снижение окисляемости.
- Поэтому эти показатели и используются для контроля и оценки коагуляционного процесса.
- При проведении коагуляции стремятся к тому, чтобы введенное в воду количество коагулянта было в последующем максимально выделено из воды в виде осадка и удалено в осветлителях или в осветительных фильтрах.
- В противном случае создается опасность загрязнения ионита и заноса в котельные агрегаты железа или алюминия. Ввиду этого важно создать такие условия, при которых введенный в воду коагулянт был бы полностью гидролизован с образованием труднорастворимых гидроокисей.

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ
ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ В
ПАРОВЫХ КОТЛАХ И
ТЕПЛООБМЕННИКАХ**

Состав, свойства и количество отложений.

- В результате воздействия тепла и реагентов, а также вследствие испарения в котловой воде протекают различные физико-химические процессы, обуславливающие разрушение одних соединений и образование других.
- Во многих случаях это ведет к возникновению трудно растворимых веществ, которые и выделяются из пересыщенных растворов в виде осадка, образующего при некоторых условиях накипь или шлам.
- .

- Накипью называют достаточно плотные отложения, возникающие на поверхности нагрева или охлаждения и способные нарушать нормальную работу котельного агрегата или теплообменника.
- Рыхлые отложения, получающиеся в результате оседания, скопления и уплотнения взвешенных веществ, образовавшихся в воде, называются шламовыми или просто шламом. Часто шламом называют также образующийся в воде осадок (взвесь) и илистые скопления в барабанах котельных агрегатов, коллекторах экранов и в различных баках. Накипные и шламовые отложения в равной мере опасны для работы котельных агрегатов.

- Отложения могут быть описаны их физическими свойствами и химическим составом.
- Из физических свойств отмечают цвет, твердость, силу сцепления с поверхностью металла, толщину, равномерность распределения по поверхности, место расположения в аппарате.
- Для характеристики химического состава отложений обычно указывают процентное содержание в них CaO , MgO , CuO , SO_3 , SiO_2 , Fe_3O_4 , Al_2O_3 , P_2O_5 , а также количество летучих соединений, проводимых в анализах под рубрикой "потери при проектировании".

- Для эксплуатации важно знать состав отложений, так как он часто позволяет вскрыть причину их образований. Химический анализ позволяет узнать род окислов и их относительное количество. Он не дает указаний на то, какие именно соединения входят в состав отложений. Ответ на этот вопрос может быть получен при помощи более сложных методов анализа, из которых следует отметить рентгенографический, кристаллооптический и термографический.
- Химический состав накипей, образующихся в паровых котельных агрегатах, весьма разнообразен.
- Однако они могут быть разделены на следующие четыре группы:

- Щелочноземельные накипи, состоящие в основном из соединений кальция и магния. К таким соединениям относятся: CaCO_3 , CaSO_4 , CaSiO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, MgO , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{PO}_4)_2$. В зависимости от того, какие из этих соединений преобладают, различают накипи карбонатные CaCO_3 , сульфатные CaSO_4 , фосфатные $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и т.д. Возможны накипи смешанного типа, когда многие соединения присутствуют в небольшом количестве.
- Железоокисные накипи, состоящие из соединений железа. В состав этого рода отложений могут входить ферросиликаты железа, фосфаты железа $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$, феррофосфат натрия NaFePO_4 и окиси железа Fe_2O_3 , Fe_3O_4 .

- Медные накипи, содержащие значительную долю меди.
- Силикатные накипи, имеющие различный состав. Наиболее важным свойством накипных отложений является их малая теплопроводность, которая изменяется в зависимости от структуры и пористости отложений примерно от 0,12 до 1,2 Вт/(м.К).
- Непосредственным результатом образования накипи является повышение температуры стенки тст обогреваемой трубы, которая определяется по формуле:

$$t_{CT} = t_B + \frac{\delta_{om}}{\lambda_{om}} q + \frac{q}{\lambda_2}$$

- где t_w – температура среды (воды);
- $\delta_{от}$, $\lambda_{от}$ - соответственно толщина и теплопроводность,
- Q - тепловой поток отложений Вт/(м.К),;
 λ_2 коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к среде:
- Расчет и опыт показывают, что при достаточно высоком тепловом потоке ($q > 250 \cdot 10^3$ Вт/м²) опасный перегрев металла достигается уже при толщине отложений 0,1-0,2 мм.

- Количество вносимых в котельный агрегат накипи - и шламообразующих веществ V_p , кг может быть определено по формуле:

$$V_p = \frac{C_{п.в} \cdot \mathcal{E}_k \cdot D_{п.в}^t}{10^3},$$

- где $C_{п.в}$ – концентрация накипи – и шламообразователей в питательной воде, мг-экв/кг;
- \mathcal{E}_k – численное значение эквивалента;
- $D_{п.в}^t$ – количество питательной воды, т/ч;
- t – время, ч.

- Так как t составляет около 8-10 тыс. ч и более, даже при малых $Сп.в$ получаются большие значения $Вр$, особенно для котельных агрегатов большой производительности.
- Однако опыт эксплуатации показывает, что не все вещества, проникающие в котельный агрегат, остаются в нем в виде шлама или накипи.
- Часть их, часто значительно большая, выводится с продувочной водой

Образование отложений в паровых котельных агрегатах

Образование щелочноземельных отложений

- Для образования щелочноземельных отложений необходимо наличие в котловой воде достаточно высокой концентрации накипеобразователей, т.е. трудно растворимых соединений. Если в ней присутствуют катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} и анионы OH^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} , то при некоторых условиях в результате их взаимодействия можно ожидать образование одного или нескольких из следующих трудно растворимых соединений:
 CaCO_3 , CaSO_4 , CaSiO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$,
 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, 3MgO , 2SiO_2 , H_2O .

- Однако выпадение этих соединений в осадок становится возможным лишь при некоторых условиях. Одно из них состоит в том, что приведение концентраций находящихся в растворе ионов трудно растворимого вещества при данной температуре есть величина постоянная, т.е.

$$\bullet C_{\text{к}} * C_{\text{А}_{\text{н}}} = \text{ПР}, \quad (5-3)$$

- где $C_{\text{к}}$, $C_{\text{А}_{\text{н}}}$ — концентрация соответственно катиона и аниона трудно растворимого соединения, г-ион/кг;
- ПР — постоянная величина, именуемая произведением растворимости.

- При $C_k * C_A > ПР$ выпадение осадка неизбежно, если же $C_k * C_A < ПР$, то раствор не насыщен и осадок не образуется.
- Для возникновения осадка, например $CaCO_3$ совсем необязательна высокая концентрация Ca^{2+} в растворе.
- Осадок может появиться и при малом значении $C_{Ca^{2+}}$, если концентрация аниона Co будет столь высокой, что возникает неравенство $C_{Ca^{2+}} * C > ПР_{CaCo}$. Для примерных расчетов можно принять, что в пределах 548-583 К для $CaCO_3$, $CaSiO_3$, $CaSO_4$ ПР составляет примерно 10⁻⁸. Тогда условие образования из кальциевых соединений будет определяться выражением

