

## ЯДЕРНАЯ ИНДУСТРИЯ

Курс лекций

### Лекция 17. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ВЫБРОСАМИ АЭС

Содержание

<b>1. ПРОБЛЕМА СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ АЭС</b>	<b>1</b>
<b>2. ВЫБРОСЫ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ</b>	<b>3</b>
2.1 Источники газообразных радионуклидов	4
2.2. Краткая характеристика газообразных выбросов АЭС	6
2.3. Нормирование выбросов радиоактивных газов в атмосферу. Ограничение абсолютных выбросов	10
<b>3. ОЧИСТКА ГАЗООБРАЗНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ АЭС</b>	<b>12</b>
3.1 Методы переработки газовых смесей	12
3.1.1 Выдержка	12
3.1.2 Фильтрование	13
3.1.3 Криогенная дистилляция	13
3.1.4 Абсорбция	14
3.1.5 Адсорбция	15
3.2 Промышленные системы газоочистки	17
3.2.1 АЭС с реактором ВВЭР	17
3.2.2 АЭС с реакторами РБМК	21
3.2.3 АЭС с быстрыми реакторами	24
<b>4. ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ АЭС</b>	<b>25</b>

Как и любая энергетическая система, АЭС выделяют в окружающую среду вредные вещества, в том числе – радиоактивные. Сбросы бывают двух типов – жидкие и газообразные.

*Сброс радиоактивных веществ (сброс) (Radioactive effluents) - контролируемое поступление радионуклидов в водоемы с жидкими отходами ядерной установки (например, атомной станции).*

*Допустимый выброс (радиоактивных веществ) (Permissible releases) - установленное для ядерной установки (например, атомной станции) значение активности радионуклидов, удаляемых за календарный год в атмосферный воздух через систему вентиляции.*

*Допустимый сброс (радиоактивных веществ) (Permissible radioactive effluents) - установленное для ядерной установки (например, атомной станции) значение активности радионуклидов, поступающих во внешнюю среду со сточными водами.*

*Удержание радиоактивных веществ (Radioactive material retention) - методы, средства и системы для предотвращения переноса или распространения недопустимых количеств радиоактивных веществ за пределы установленных границ даже в случае аварии.*

При штатном режиме работы АЭС, выбросы эти не велики, поскольку атомные электростанции оснащены эффективными системами очистки сбросов от радионуклидов и других вредных веществ. Эти системы удерживают все недопустимые с точки зрения экологии компоненты и не допускают их выхода за пределы технологических линий.

*Удержание радиоактивных веществ (Radioactive material retention) - методы, средства и системы для предотвращения переноса или распространения недопустимых количеств радиоактивных веществ за пределы установленных границ даже в случае аварии.*

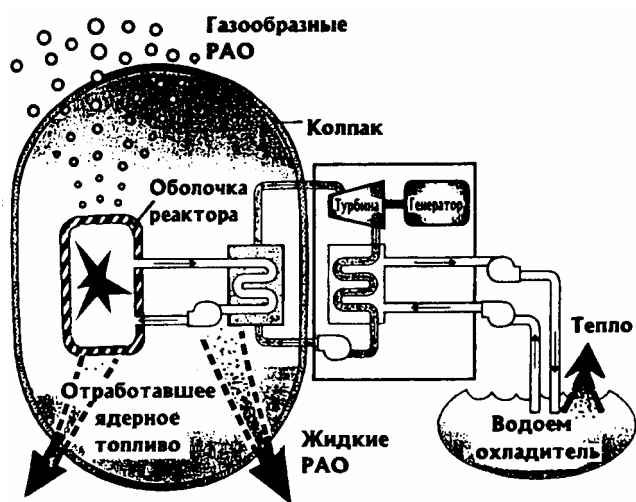
В данной лекции мы рассмотрим процессы образования газообразных нуклидов в ядерном реакторе и системы спецгазоочистки АЭС.

### 1. ПРОБЛЕМА СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ АЭС

Масштабы строительства, прогнозы развития атомных электростанций (АЭС), теплоэлектростанций (АТЭС) и станций теплоснабжения (АСТ) во многих странах

свидетельствуют о возрастающей, а для некоторых стран решающей роли ядерной энергетики в электроснабжении и выработке тепла среднего и низкого потенциала для промышленного и коммунально-бытового теплоснабжения.

С самого начала при создании АЭС уделяли пристальное внимание всем аспектам безопасности, повышению надежности и работоспособности реакторного оборудования и соответствующих систем, разработке норм безопасности и определению степени риска в ядерной энергетике. Поэтому состояние окружающей среды вокруг АЭС значительно благоприятнее, чем в других областях энергетики. Это достигается тем, что прямой выход радиоактивных отходов ядерных реакторов в окружающую среду предотвращается многоступенчатой системой радиационной защиты (топливная матрица, оболочка твэлов, контур теплоносителя, герметичные производственные помещения). На всех АЭС предусматривают меры по предотвращению радиоактивных выбросов в окружающую среду как в условиях нормальной эксплуатации, так и при аварийных ситуациях. Защита населения от недопустимого радиационного воздействия в случае аварии обеспечивается специальными защитными и локализирующими устройствами. Первые



предупреждают развитие аварии и ограничивают ее масштаб, вторые - ограничивают радиационные последствия аварии для окружающей среды.

Повышенное внимание к радиационной безопасности вызвано тем, что в ядерном реакторе образуются высоко радиоактивные продукты, способные потенциально загрязнять окружающую среду (Рис.1), причем испускаемое ими излучения имеют скрытый, не осязаемый человеком характер воздействия.

Рис. 1 Схема образования газообразных, жидких, твердых (ОЯТ) отходов и теплового загрязнения от АЭС.

Основным потенциальным источником загрязнения биосферы и облучения населения, проживающего вблизи АЭС, являются газоаэрозольные отходы, образуемые в процессе эксплуатации станции. Хотя газоаэрозольные выбросы станции не ведут к заметному загрязнению окружающей среды, сохраняют актуальность работы, направленные на дальнейшее их снижение. В перспективе следует не допустить не только облучения населения, проживающего вблизи АЭС, но и возрастания популяционной дозы. Проблема большой важности - обеспечение гарантий против аварийного загрязнения внешней среды. Решение ее существенно облегчит задачу размещения объектов ядерной энергетики вблизи крупных городов.

Выделяют два принципиально различных направления в работах по снижению загрязнения окружающей среды: **активный** и **пассивный**.

Применительно к атомной энергетике активный способ заключается в предупреждении выбросов радиоактивных продуктов в окружающую среду в результате совершенствования технологических схем и оборудования; в создании замкнутого технологического процесса, исключая выброс этих продуктов в окружающую среду; в отработке и совершенствовании топливных элементов; в создании высокоэффективных систем очистки.

Пассивный способ основан на использовании эффекта рассеивания примесей радиоактивных веществ.

Тот или иной способ предотвращения загрязнения окружающей среды выбирают, учитывая такие факторы, как тип и мощность реактора, плотность населения вблизи станции и

метеорологические условия в зоне размещения атомной станции, отработку и эффективность очистки таких систем.

Проиллюстрируем особенности подходов к уменьшению хронического загрязнения радионуклидами окружающей среды на примере уменьшения активности **газообразных** отходов АЭС.

## 2. ВЫБРОСЫ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ

Любая работающая АЭС оказывает мощное влияние на окружающую среду по трем направлениям: газообразные (в том числе радиоактивные) выбросы в атмосферу, выбросы большого количества тепла и неизбежное распространение вокруг АЭС какого-то количества жидких радиоактивных отходов.

**Выброс радиоактивных веществ** - поступление радионуклидов в атмосферу в результате работы ядерной установки (например, атомной электростанции).

**Сброс радиоактивных веществ (сброс)** - контролируемое поступление радионуклидов в водоемы с жидкими отходами ядерной установки (например, атомной станции).

В процессе работы реактора АЭС суммарная активность делящихся материалов возрастает в миллионы раз. Так, при полной загрузке реактора ВВЭР-440 (а это более 30 т урана) суммарная активность топлива, с обогащением 3% по урану-235, составляет  $6 \cdot 10^{11}$  Бк (16 Ки). Через год эксплуатации радиоактивность продуктов, образовавшихся в процессе деления ядер, составит  $4 \cdot 10^{19}$  Бк ( $10^9$  Ки). При производстве 1 ГВт/год электроэнергии в реакторе АЭС образуется  $10^{19}$  Бк (300 млн Ки) продуктов деления.

При штатной эксплуатации ядерной установки, выброс радионуклидов в окружающую среду не должен превышать некоторых пределов, установленных законодательством страны.

**Допустимый выброс (радиоактивных веществ)** - установленное для ядерной установки (например, атомной станции) значение активности радионуклидов, удаляемых за календарный год в атмосферный воздух через систему вентиляции.

**Допустимый сброс (радиоактивных веществ)** - установленное для ядерной установки (например, атомной станции) значение активности радионуклидов, поступающих во внешнюю среду со сточными водами.

С точки зрения радиоактивного загрязнения среды работающими в штатном режиме АЭС, первостепенный интерес представляют газоаэрозольные выбросы, как наименее контролируемые после их возникновения. В реакторе любой АЭС из уранового топлива образуются посредством деления атомов около 300 различных радионуклидов, из которых более 30 могут попасть в атмосферу. Среди них: иод-129 (период полураспада 16 млн лет), углерод-14 (5730 лет), цезий-137 (30 лет), тритий (12,3 года), криптон (10,6 лет), иод-131 (8 суток), ксенон-133 (5,27 суток), иод-133 (5,27 суток), иод-133 (20,9 часа), аргон-41 (1,82 часа), криптон-87 (78 мин), ксенон-138 (17 мин), азот-16 (7,35 сек).

Замечание: Нарботка криптона-85 реактором на несколько порядков выше, чем всех остальных радионуклидов.

Возникшие газы через микротрещины ТВЭЛов (в реакторе ВВЭР-1000 находится 48 тыс ТВЭЛов), а также в процессе извлечения ТВЭЛов в ходе их периодической замены, попадают в теплоноситель.

Замечание: По статистике один из 5000 ТВЭЛов имеет какие-то серьезные повреждения оболочки, облегчающие попадание продуктов деления в теплоноситель. Эксплуатационным регламентом российских АЭС допускается наличие до 1% ТВЭЛов с поврежденной защитной оболочкой.

Реактор типа ВВЭР образует в год около 40000 Ки газообразных радиоактивных отходов. Большинство из них удерживается фильтрами или быстро распадаются, теряя радиоактивность. При этом реакторы типа РБМК дают на порядок больше газообразных выбросов, чем реакторы типа ВВЭР Среднесуточный выброс радиоактивных газов и аэрозолей на Курской АЭС в 1981-90 и Смоленской в 1991-92 достигал 600-750 Ки/сутки. В среднем в сутки на территории России газообразные выбросы АЭС составляли до 1993 г около 800 Ки (за год - около 300 тыс Ки).

*Замечание:* Суммарная величина лицензионных (разрешенных и запланированных) выбросов от всех существующих АЭС в мире на протяжении всего срока их эксплуатации, превышает общую величину чернобыльского взрыва.

Большая часть радиоактивности газоаэрозольных выбросов генерируется короткоживущими радионуклидами и без ущерба для окружающей среды распадается за несколько часов или дней.

Кроме обычных газообразных выбросов время от времени АЭС выбрасывает в атмосферу небольшое количество радионуклидов - продуктов коррозии реактора и первого контура, а также осколков деления ядер урана - хром-51, магний-54, кобальт-60, ниобий-95, рутений-106, церий-144 и др. Они прослеживаются на несколько десятков километров вокруг любой АЭС.

## **2.1 Источники газообразных радионуклидов**

Хотя принцип работы всех реакторов, где используется реакция деления, одинаков, их технологические схемы и оборудование в зависимости от типа реактора и применяемого теплоносителя различны. Поэтому, несмотря на практически одинаковые источники радиоактивных отходов на атомных станциях, возможные пути проникновения радиоактивных веществ в окружающую среду различаются.

В процессе эксплуатации АЭС, происходит наработка продуктов деления в топливе. В реакторах большой мощности ежедневно образуется несколько килограммов продуктов деления (суммарной активностью  $(1-300) \cdot 10^{15}$  Бк). При этом основная активность продуктов деления обусловлена короткоживущими осколками ядер. Первым защитным барьером, удерживающим эти продукты в топливе, являются оболочка твэла. Вследствие возможной разгерметизации оболочек твэлов продукты деления могут проникать в теплоноситель. Это относится к газообразным элементам, таким, как Хе, Кг, а также летучим - I, Ru и др.

Источником радиоактивности в реакторах является наведенная радиоактивность. Основными продуктами активации теплоносителя и содержащихся в нем примесей являются радионуклиды таких элементов, как: Ne, Ar, F, Cl, Na, K, Mn, Co, Fe, Cu, Zn, Ag,  $^3\text{H}$ , C и др. Все они находятся в замкнутом герметичном контуре, включающем в себя бак реактора, насосы, теплообменное оборудование и трубопроводы. Указанное оборудование является вторым защитным барьером на пути проникновения радиоактивных веществ в окружающую среду. Протечки теплоносителя могут стать потенциальным источником радиационной опасности.

Другая часть наведенной радиоактивности - радиоактивные вещества, образующиеся за счет активации теплоносителя вне первого контура реактора. К ним относят, например, радиоактивные отходы, получающиеся в результате активации теплоносителя, охлаждающего графитовую кладку активной зоны или биологическую защиту.

Третий и четвертый защитные барьеры на пути проникновения радиоактивных веществ во внешнюю среду - это производственные помещения первого контура: герметичные боксы и защитная оболочка реактора с обслуживающими их защитными системами.

Часть образующихся радиоактивных веществ за счет тех или иных технологических операций непрерывно или периодически выделяется из первого контура. Если невозможно обеспечить полную изоляцию радиоактивных веществ от биосферы, то утечки их в окружающую среду необходимо свести до уровня, допустимого санитарными правилами. Кроме того, нормами проектирования АЭС предусматривается создание специальных систем по обезвреживанию и удалению радиоактивных отходов.

При работе АЭС образуются три вида радиоактивных отходов: твердые, жидкие или газообразные.

Газообразные отходы после очистки и фильтрации рассеивают в атмосфере через вентиляционные трубы с соблюдением нормативов по выбросу радиоактивных веществ. Жидкие отходы очищают, фильтруют, разбавляют или концентрируют и хранят в емкостях в жидком виде или предварительно отверждают. Это повышает безопасность и надежность хранения.

Твердые отходы в виде деталей загрязненного радиоактивными веществами демонтированного оборудования, отработанных фильтров для очистки воздуха, спецодежды, мусора и т.п. захоранивают в специальные траншеи. При этом принимают меры по уменьшению объема твердых отходов (сжигают, прессуют) и предотвращению распространения радиоактивных веществ в грунт.

Состав радиоактивных отходов и их активность зависят от типа и конструкции реактора, от вида ядерного горючего и теплоносителя и применяемых систем очистки.

Рассмотрим более подробно источники образования **газообразных** отходов на АЭС, с медленным реактором, работающим на урановом топливе.

Первый контур реактора стремятся выполнить максимально герметичным, чтобы свести к минимуму выход радиоактивного теплоносителя в окружающую среду. Однако это не всегда возможно, поэтому большинство реакторов работают с небольшой продувкой теплоносителя первого контура. Она может быть организованной и технологически обоснованной и неорганизованной, обусловленной утечками из дефектного оборудования. Для восстановления потерь теплоносителя проводят его подпитку обессоленной и обескислороженной водой.

При эксплуатации реактора теплоноситель первого контура всегда содержит определенное количество растворенных газов. Для водо-водяных реакторов источники газов следующие: радиолиз воды; коррозия конструкционных материалов; газовые компенсаторы объема; подпитка теплоносителя; дефектные ТВЭЛы; химические добавки для поддержания заданного водного режима; ядерные реакции; радиолиз и термордиолиз ионитов системы очистки первого контура. Для реакторов на быстрых нейтронах и с натриевым теплоносителем источниками газов являются защитные газовые полости реактора, дефектные твэлы, примеси теплоносителя.

Радиолиз воды. Под действием различных видов мощного ионизирующего излучения молекулы воды и растворенные в ней примеси разрушаются, возбуждаются и ионизируются. Происходит радиолиз воды, в результате которого образуются  $H$ ,  $OH$ ,  $H_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $O_2$ ,  $HO_2$ ,  $H_2O$ . Многие из них обладают окислительными или восстановительными свойствами в зависимости от содержащихся примесей в теплоносителе, температур, давлений в первом контуре и т.п.

Чтобы уменьшить радиолиз повышают концентрацию водорода в теплоносителе. Это делают путем добавления в теплоноситель гидразина или аммиака. Обычно концентрация водорода поддерживается на уровне  $20 - 50 \text{ см}^3/\text{кг}$ . В этом случае кислород, введенный в контур, например, с подпиточным теплоносителем, рекомбинирует с водородом. Радиолиз теплоносителя в таких условиях не является источником кислорода.

Коррозия конструкционных материалов. При работе реактора все материалы, применяемые для изготовления оборудования первого контура, с той или иной скоростью корродируют в зависимости от их коррозионной стойкости и условий эксплуатации в контуре. Коррозия материала сопровождается выделением водорода, часть которого входит в структуру металла, образуя гидриды, а часть либо диффундирует в воду первого контура, либо уходит в окружающую среду через стенки сосудов и труб. При этом коррозия является достаточно мощным источником водорода, так как поверхности материалов и сплавов, омываемые теплоносителем, исчисляются тысячами квадратных метров.

Дефектные твэлы. В современных энергетических реакторах применяют твэлы самых различных конструкций с использованием различного топлива (окислы, металлы, карбиды и т.д.). Наибольшее распространение получило топливо из двуокиси урана. В качестве материала оболочек широко используют нержавеющие стали и циркониевые сплавы. Оболочка предохраняет топливо от химического воздействия теплоносителя, а теплоноситель - от попадания частиц ядерного топлива и осколков деления. После года работы реактора на 1 кВт его мощности в активной зоне образуется около 1.8 ТБк ( $1.8 \cdot 10^{12}$  Бк) нуклидов криптона ( $^{83m}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ) с массой 5,2 мг; 3.3 ТБк нуклидов ксенона ( $^{131m}\text{Xe}$ ,  $^{133m}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ) с массой 55.7 мг; 6.4 ТБк нуклидов иода ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ) с массой 2,6 мг; 0.054 ТБк нуклидов цезия ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{136}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) с

массой 35 мг; 3,4 ТБк нуклидов стронция ( $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{91}\text{Sr}$ ) с массой 14,6 мг. Приблизительно 0.1 общего количества газообразных продуктов деления ( $25 \text{ см}^3/(\text{МВт}\cdot\text{сут})$ ) диффундирует из объема горючего к поверхности сердечника и далее в зазор между топливом и защитной оболочкой или в специальный газосборник. Если по какой-то причине произойдет разгерметизация оболочки твэла, то часть этих газообразных продуктов и легколетучих продуктов деления через щель дефекта может выйти из твэла в теплоноситель. Химическая концентрация их будет незначительной. Однако данный источник газа важен с точки зрения влияния на радиационную безопасность станции.

**Радиолиз и термолиз ионитов.** Для очистки теплоносителя первого контура водо-водяных реакторов от различных примесей и продуктов коррозии, а также для поддержания заданного водяного режима применяют ионообменные катионитовые и анионитовые фильтры. Перед подачей воды на фильтр температуру теплоносителя понижают до  $50^\circ\text{C}$ , чтобы обеспечить необходимую устойчивость анионообменников. В процессе эксплуатации фильтров на них сорбируются продукты коррозии и деления. Активность на фильтре может достигать десятков терабеккерелей. Поэтому со временем может иметь место разрушение ионитов (в основном анионитов) с выделением продуктов термического и радиационного разрушения в фильтрах. Попав в первый контур, продукты деления претерпевают радиационно-химические превращения, давая в конечном итоге водород, аммиак и угольную кислоту. Обычно фильтры проектируют таким образом, чтобы потери емкости анионита в конце срока службы фильтра не превышали 30% исходной.

**Ядерные реакции.** В процессе работы ядерного реактора в небольшом количестве образуются газы - продукты ядерных реакций:  $^{14}\text{C}$  - при активации азота и кислорода, содержащихся в виде примеси в топливе и теплоносителе, при тройном делении в топливе;  $^3\text{H}$  - при тройном делении в топливе и за счет активации  $\text{Li}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{D}$ , содержащихся в виде примеси в теплоносителе;  $^{18}\text{F}$ ,  $^{20}\text{F}$  - при активации ядер воды и натрия;  $^{23}\text{Ne}$  - при активации ядер натрия;  $^{41}\text{Ar}$  - при активации  $^{40}\text{K}$  в натрии и  $^{40}\text{Ar}$  в воде и воздухе.

$^{18}\text{F}$ ,  $^{20}\text{F}$ ,  $^{23}\text{Ne}$  из-за малого периода полураспада и низкой химической концентрации практического интереса не представляют и поэтому в дальнейшем не рассматриваются. Остальные радионуклиды, хотя и образуются с низкими химическими концентрациями, однако имеют большой период полураспада, хорошо (кроме  $^{41}\text{Ar}$ ) усваиваются объектами внешней среды и поэтому важны с точки зрения обеспечения радиационной безопасности.

## **2.2. Краткая характеристика газообразных выбросов АЭС**

В процессе эксплуатации АЭС образующиеся в первом контуре реактора газы выводятся из контура (либо утечкой теплоносителя, либо организованной продувкой) на очистку. По ходу они взаимодействуют с конструкционными материалами, участвуют в радиационно-химических реакциях с теплоносителем и друг с другом, поглощаются ионитовыми фильтрами, диффундируют через металлические поверхности и т.д.

Основные источники газообразных отходов - система байпасной очистки теплоносителя первого контура (АЭС с реакторами типа ВВЭР) и эжектор конденсатора турбины (АЭС с реакторами типа РБМК).

Характер газообразных радиоактивных выбросов зависит от типа реактора и системы обращения с этими отходами. В радиоактивные благородные газы (РБГ) (Радионуклиды  $\text{Kr}$ ,  $\text{Xe}$ ), пары  $^3\text{H}$  и  $^3\text{H}_2$  в газообразной форме, активационные газы ( $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{16}\text{N}$ ), галогены и радиоактивные вещества в твердой форме (продукты деления и активации).

Таблица 1 Основные радиационные характеристики газообразных нуклидов [11]

Нук-лид	$T_{1/2}$	$E_{\beta}$ , МэВ	$E_{\gamma}$ , МэВ	Нук-лид	$T_{1/2}$	$E_{\beta}$ , МэВ	$E_{\gamma}$ , МэВ	
$^3\text{H}$	12,26 года	0,0186	–	$^{133}\text{Xe}$	5,27 сут	0,346	0,081 (37%)	
$^{14}\text{C}$	5730 лет	0,156	–	$^{133m}\text{Xe}$	2,3 сут	–	0,233 (14%)	
$^{41}\text{Ar}$	1,83 ч	2,49 (0,8%) 1,198 (99,2%)	1,293 (99%)	$^{135}\text{Xe}$	9,14 ч	0,92	0,250 (91%)	
							0,61 (3%)	
$^{83m}\text{Kr}$	1,86 ч		0,009 (9%)	$^{135m}\text{Xe}$	15,6 мин	–	0,527 (80%)	
$^{85}\text{Kr}$	10,76 года	0,67	0,514 (0,41%)	$^{137}\text{Xe}$	3,9 мин	4,1	0,455 (33%)	
			0,150 (74%)					
			0,305 (13%)	$^{138}\text{Xe}$	17,5 мин	2,4	Сложный	
$^{85m}\text{Kr}$	4,4 ч	0,82		$^{139}\text{Xe}$	43 с	–	”	
$^{87}\text{Kr}$	76 мин	3,8	0,403 (84%)	$^{140}\text{Xe}$	16 с	–	0,13	
			0,85 (16%)	$^{131}\text{I}$	8,05 сут	0,806	0,080 (2,6%)	
			2,57 (35%)				0,284 (5,4%)	
							0,364 (82%)	
$^{88}\text{Kr}$	2,8 ч	2,8	0,166 (7%)				0,637 (6,8%)	
			0,191 (35%)				0,723 (1,6%)	
			0,36 (5%)	$^{132}\text{I}$	2,26 ч	2,12	Сложный	
			0,85 (23%)	$^{133}\text{I}$	20,3 ч	1,27	0,53 (90%)	
			1,55 (14%)					
			2,19 (18%)					
			2,4 (35%)	$^{134}\text{I}$	52 мин	2,43	–	
$^{89}\text{Kr}$	3,18 мин	4,0	Сложный	$^{135}\text{I}$	6,68 ч	1,4	Сложный	

Радиоактивные инертные газы. При делении топлива образуется более десятка нуклидов тяжелых благородных газов: Xe и Kr, имеющих различные радиационные характеристики (Табл.1). Общий объем их в расчете на 1 МВт.сут равен 25 см<sup>3</sup> (при нормальном давлении и комнатной температуре). В теплоноситель они попадают при разгерметизации оболочек ТВЭлов. В реакторах типа ВВЭР РБГ могут поступать во внешнюю среду с утечкой воды из первого контура. Общая их активность равна 0.3 ТБк/МВт(эл).год (Табл.2 и 3), причем основной вклад в активность этих отходов вносит  $^{133}\text{Xe}$  (Табл. 4).

В реакторах кипящего типа РБГ во внешнюю атмосферу могут попасть вместе с неконденсирующимися газами, отсасываемыми эжектором из конденсатора турбины. Их активность в десятки и сотни раз больше активности РБГ в выбросах реакторов типа ВВЭР и изменяется в широком диапазоне: от 0.074 до 4.4 ТБк/МВт(эл).год. Около 60% всей активности приходится на короткоживущие нуклиды  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{85m}\text{Kr}$ .

Табл. 2 Поступление радиоактивных газообразных отходов в атмосферу (1979 г.)

Тип реактора	Активность, МБк/[МВт (эл.)]*год		
	РБГ, ТБк	Иод	Аэрозоли (без иода)
ВВЭР	0,11 – 0,28	0,74 – 9,25	0,37 – 11
РБМК	<2,8	3,7 - 560	0,3

Табл. 3. Среднее количество радиоактивных газоаэрозольных выбросов (ГБк на ГВт произведенной электроэнергии) разных реакторов (средние данные за 1980-1984)

Реактор	РБГ*	Иод-131	ДЖН**	Тритий
		10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	
РБМК	5500	80	16	1.3
ВВЭР	220	1.7	4.5	5.9
CSR	2320	1.4	1.4	54
BWR	2200	9.3	43	3.4
HWR	210	0.23	0.04	670

\*радиоактивные благородные (инертные) газы

\*\*Долгоживущие радионуклиды

**Табл. 4.** Состав РБГ и йода в газообразных отходах АЭС

Нуклид	Относительное содержание, %					
	ВВЭР	PWR		РБМК	ВВР	
<sup>41</sup> Аг	0,2	0,03		0,3	—	
<sup>85</sup> Кг	6	1	4,6	0,7	2	12,8
<sup>85m</sup> Кг	5,4	0,6		6,6	5	3,3
<sup>87</sup> Кг	1	0,4		13,4	12	10,2
<sup>88</sup> Кг	2,2	0,9		18,6	14	9,8
<sup>133</sup> Xe	72	90	85,8	35,2	14	11,7
<sup>133m</sup> Xe	—	0,5		—	0,6	
<sup>135</sup> Xe	13,2	3,2	4,76	25,4	26	18,2
<sup>135m</sup> Xe	—	0,8		—	4	8,4
Другие изотопы Хе	—	2,5		—	22,4	
Всего ИРГ	100	100		100	100	
<sup>131</sup> И	58,9	98	30	23,8	12,7	9
<sup>133</sup> И	31,9	1		43,5	39,7	
<sup>135</sup> И	8,3	1		32,7	47,6	
Всего	100	100		100	100	

Криптон трудно улавливается фильтрами и очень подвижен в атмосфере (в том числе и потому, что не поглощается ни Мировым океаном, ни почвами). Масштабы образования криптона-85 на несколько порядков выше, чем всех остальных радионуклидов - 375 Ки-МВт.год. Криптон как химический элемент не вовлекается в биологические процессы. Однако он поглощается тканями тела при дыхании и хорошо растворяется в жировых тканях человека и животного. Уже поэтому испускаемая им радиация должна оказывать какое-то влияние на биологические процессы, например, блокируя электропроводность тканей. Малые дозы облучения криптоном-85 повышают частоту рака кожи, опасен он для беременных. Особенно отмечается роль криптона-85 в изменении электропроводности атмосферы, что может вызвать серьезные геофизические эффекты, например, уменьшение электрического заряда Земли и изменение магнитного поля, уменьшение электрического сопротивления атмосферы между океанами и ионосферой, увеличение электризации гроз, изменение характера осадков, увеличение числа смерчей и торнадо. Количество криптона-85 в атмосфере ежегодно увеличивается. Сейчас содержание <sup>85</sup>Кг в атмосфере в миллионы раз выше, чем до начала атомной эры.

Активационные газы (<sup>41</sup>Аг, <sup>14</sup>С, <sup>13, 16</sup>Н). <sup>41</sup>Аг образуется при захвате нейтрона ядром <sup>40</sup>Аг. Мощность выброса <sup>41</sup>Аг в атмосферу на ядерных реакторах зависит от их конструктивных и технологических особенностей. Как правило, для рассматриваемых типов реактора относительное содержание его в выбросах не превышает 0.3% общей активности (Табл.4). Однако на РБМК для охлаждения графитовой кладки активной зоны используют воздух или специальный газовый контур с инертным теплоносителем (He+N). Содержание Аг в воздухе составляет 0,93, в азоте - доходит до 0,3-0,5 объемных %. Обычно активность <sup>41</sup>Аг в газовых отходах достигает нескольких десятков терабеккерелей. Однако задержка, которой подвергаются газы сдувок из этого контура перед выбросом в систему вентиляции, значительно снижает их активность.

Радиоактивный углерод. <sup>14</sup>С может образовываться на ядерных реакторах в результате реакций <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>С (активации азота, находящегося в виде примеси в топливе), а также при тройном делении; <sup>17</sup>O(n,α)<sup>14</sup>С (активации кислорода, содержащегося в окисном топливе и в замедлителе) и <sup>13</sup>С(n,γ)<sup>14</sup>С, которые по сравнению с другими являются наиболее практически



значимыми. На АЭС с реакторами кипящего типа и водой под давлением выбросы  $^{14}\text{C}$  колеблются в диапазоне 0,22 - 0,67 ГБк/МВт(эл).год. (Гига =  $10^9$ ).

Выброс  $^{14}\text{C}$  из реакторов кипящего типа происходит в основном в форме  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  и  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , причем на долю  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и углеводородов приходится соответственно 95; 2,5 и 2,5%. На реакторах с водой под давлением 80%  $\text{CO}$  приходится на долю  $\text{CH}_4$  и  $\text{C}_2\text{H}_2$ , на  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  - менее 5%. На реакторах с водой под давлением поступающие в атмосферу из теплоносителя первого контура газы содержат слабощелочные соединения углерода. На реакторах кипящего типа преобладающим механизмом является окисление углерода до  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  кислородными радикалами, образующимися при электролизе охлаждающей воды.

Углерод-14 в большом количестве накапливается в биосфере, замещая обычный углерод в органических соединениях. При распаде углерод превращается в азот и органическая молекула разрушается. Если это происходит в молекуле ДНК или РНК, должен произойти разрыв хромосомы, и возникнуть мутация. Есть основания предполагать, что накопление углерода-14 ведет к замедлению роста деревьев. Сейчас в составе атмосферы количество  $^{14}\text{C}$  увеличено на 25% по сравнению с до атомной эрой.

Тритий в природе может существовать в газообразном виде и в окисленных формах НТО,  $\text{T}_2\text{O}$ , может также входить в состав более сложных органических и неорганических соединений. Газообразная форма трития неустойчива. Она сравнительно быстро окисляется. На АЭС с ВВЭР и РБМК в теплоносителе тритий существует в основном в виде тритиевой воды, в продувочном газе - в газообразной и окисленной формах. В реакторе тритий образуется при тройном делении ядерного топлива; в результате реакции нейтронной активации  $\text{Li}$  и  $\text{B}$ , растворенных в теплоносителе первого контура; а также активации дейтерия, содержащегося в теплоносителе в качестве примеси (до 0,015%). Основным источником трития в теплоносителе реактора ВВЭР являются реакции  $^{10}\text{B}(n,2\alpha)^3\text{H}$  (бор добавляется в теплоноситель в виде борной кислоты) и  $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$  (литий попадает в виде примеси к гидроокиси калия), а также выход трития за счет диффузии и из негерметических твэлов.

В реакторе типа РБМК поддерживается нейтральный водный режим, и тритий в теплоносителе накапливается только в результате выхода из твэлов, а также активации дейтерия. Более существенный выброс трития в атмосферу может дать азотно-гелиевый контур охлаждения графитовой кладки реактора. Здесь тритий образуется по реакции  $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$  в количестве 3.3 ГБк/ч.

В АЭС с реакторами типа ВВЭР и РБМК за счет тройного деления в твэлах образуется около 0,37-0,74 ГБк/МВт(эл).год трития. Для реакторов типа ВВЭР переход  $^3\text{H}$  в жидкие и газообразные отходы принимают равным 74 и 7,4; для реакторов с кипящей водой - 2,6 и 0,18 ГБк/МВт(эл).год. Через оболочку из циркониевого сплава в теплоноситель вследствие диффузии поступает примерно 0,1 трития, находящегося под оболочкой. Если оболочка твэла сделана из нержавеющей стали, то скорость поступления трития в теплоноситель приблизительно в 10 раз больше.

Тритий может замещать водород во всех соединениях с кислородом, серой, азотом. А эти соединения составляют значительную часть массы животных организмов. Доказано, что он легко связывается протоплазмой живых клеток и накапливается в пищевых цепях. Когда тритий распадается, он превращается в гелий и испускает бета-излучение. Эта трансмутация должна быть очень опасной для живых организмов, т.к. при этом поражается генетический аппарат клеток.

Радионуклиды иода. При реакции деления, а также при распаде продуктов деления образуется несколько радионуклидов иода. Наибольший вклад в дозу облучения дают нуклиды с массовыми числами 129, 131, 132, 133, 134 и 135. Для всех из них за исключением  $^{129}\text{I}$ , в активной зоне реактора достаточно быстро устанавливается равновесное состояние. Попасть в окружающую

среду радионуклиды иода могут только при разгерметизации оболочки твэла и первого контура. Как источник облучения наиболее важным нуклидом иода является  $^{131}\text{I}$ . В равновесных условиях его активность колеблется от 0,92 до 1,1 пБк/МВт (теп). Долгоживущий  $^{129}\text{I}$  не обнаруживают в окружающей среде вокруг АЭС, и его выбросы значительно меньше выбросов других радионуклидов иода.

$^{131}\text{I}$  может существовать либо в аэрозольной, либо в газовой форме. Соотношение этих форм зависит от многих факторов и различно для разных АЭС, более того, оно может меняться по пути доставки отходов к сбросным устройствам. В отходах  $^{131}\text{I}$  представлен молекулярным иодом и иодом в органических соединениях, главным образом в виде иодистого метила  $\text{CH}_3\text{I}$ .

На реакторах с обычной водой 73% радионуклидов иода присутствуют в виде органических соединений, 22% иодноватистой кислоты, 5% элементарного иода. Средние выбросы  $^{131}\text{I}$  из реакторов с кипящей водой и водой под давлением равны 74-185 и 1,85-22,2 МБк/МВт(эл).год. Выбросы  $^{131}\text{I}$  из реактора РБМК существенно ниже, чем из ВВЭР. Это объясняется тем, что у данного реактора отмечается пониженный выход иода из негерметичных твэлов в теплоноситель.

Выброс иода из реакторов РБМК и ВВЭР определяется расходом неограниченных протечек теплоносителя в технологические помещения и выходом иода в воздух помещений. Обычно протечки теплоносителя на РБМК больше, чем на реакторах ВВЭР. Однако на АЭС с реакторами РБМК допустима перегрузка дефектных твэлов на ходу, что позволяет своевременно их заменять. Это, а также меньший выход иода из-под оболочки дефектного твэла приводит к уравниванию выброса иода из-за протечки теплоносителя.

Радиоактивный иод вызывает нарушение гормонального уровня у человека, летаргию и ожирение.

Аэрозоли. Часть продуктов деления, продукты распада РБГ и нуклиды с наведенной активностью образуют аэрозоли, которые с воздушными потоками могут поступать во внешнюю среду. Количество таких аэрозолей зависит от типа реактора, его мощности, эффективности систем газоочистки, водоочистки и ограничивающих барьеров, продолжительности эксплуатации и т.п.

В составе аэрозолей, выбрасываемых из АЭС с реактором ВВЭР, идентифицируют несколько десятков радионуклидов. Наиболее типичные из них:  $^{131}\text{I}$ ,  $^{89,90,91}\text{Sr}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{141,144}\text{Ce}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{54,55}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{58,60}\text{Co}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{22,24}\text{Na}$ ,  $^{88}\text{Rb}$ ,  $^{99}\text{Mo}$  и др. Аэрозоли, образующиеся в результате деления или распада РБМК, в газовых выбросах АЭС появляются после разгерметизации оболочки твэла. Их доля в общей смеси долгоживущих радионуклидов колеблется в широких пределах (10-80% общей активности) и зависит от состояния активной зоны. Активность отдельных радионуклидов изменяется от нескольких сотых до нескольких единиц гигабеккерелей в год. Суммарное содержание твердой фракции в выбросах на реакторах ВВЭР примерно 2.2 МБк/МВт(эл).год.

Помимо радиоактивных, при работе АЭС образуются многочисленные стабильные продукты, в той или иной степени взрывоопасные (например, водород, озон) или токсичные. Системы очистки сбросных газов должны эффективно удалять их. Многие стабильные вещества (вода, аммиак, углекислый газ и др.) которые сами по себе может и не опасны, но они крайне негативно влияют на процессы извлечения радионуклидов из сбросных газов. Есть, наконец, ценные компоненты, которые нужно выделять из сбросов, очищать и возвращать в технологический процесс. По этим причинам, системы очистки обычно являются комбинированными – они занимаются переработкой смесей радиоактивных, и стабильных газов.

### **2.3. Нормирование выбросов радиоактивных газов в атмосферу. Ограничение абсолютных выбросов**

В процессе работы АЭС образуются жидкие, газообразные, аэрозольные и твердые радиоактивные отходы. На пути поступления радиоактивных отходов во внешнюю среду

предусматривают различные защитные барьеры. К ним, в частности относят: топливную матрицу, оболочку твэлов, контур первичного теплоносителя, герметичные помещения реакторной установки, газового контура, контура очистки теплоносителя и всех остальных контуров и оборудования с радиоактивными средами, защитные оболочки (для ограничения выбросов при аварийной ситуации). Кроме того, для всех реакторов ограничивается количество допустимых негерметичных твэлов в активной зоне. В результате этого радиоактивные отходы за пределы АЭС выходят в количествах, не превышающих допустимые.

Ограничение воздействия источников излучения на человека определены нормами радиационной безопасности (НРБ), основными дозовыми пределами и производными от них величинами. НРБ допускают облучение отдельных лиц из населения в пределах дозы (ПД), равной  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $1,5 \cdot 10^{-2}$  и  $3 \cdot 10^{-2}$  Зв в год для I, II и III групп критических органов соответственно (Табл. 5).

**Табл. 5.** Предел дозы (ПД) ограниченной части населения (категория Б), обусловленный радиоактивными отходами, мЗв/год

Радиоактивные отходы	Доля, НРБ	Группа критических органов		
	%	I	II	III
Газоаэрозольные сбросы	4	0.2	0.6	1.2
Жидкие сбросы	1	0.05	0.15	0.3
Всего	5	0.25	0.75	0.75

*Примечание.* I группа — все тело, гонады и красный костный мозг; II — мышцы, щитовидная железа, жировая ткань, печень, почки, селезенка, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталик глаза и другие органы, за исключением тех, которые относятся к I и III группам; III группа — кожный покров, костная ткань, кисти, предплечья, лодыжки и стопы.

Дозовая квота от радиоактивных отходов АЭС составляет лишь 5% регламентированного НРБ предела дозы. Дозовый предел на все тело составляет 1/4 дозы, обусловленной естественным радиационным фоном. Ее практически невозможно измерить на уровне фона, и, следовательно, контролировать. Поэтому кроме пределов дозы устанавливаются производные (вторичные) характеристики, полученные из расчета по тем или иным моделям. К таким производным характеристикам относят предельно допустимые выбросы (ПДВ) радиоактивных газов и аэрозолей в атмосферу и предельно допустимые сбросы (ПДС) жидких радиоактивных отходов во внешнюю среду. Современные приборы позволяют регистрировать достаточно низкие уровни радиоактивности. В связи с этим санитарные правила (СП АЭС) устанавливают и среднемесячные допустимые выбросы (ДВ) газоаэрозольных и годовые допустимые сбросы (ДС) жидких радиоактивных отходов АЭС во внешнюю среду, действующие в период нормальной эксплуатации АЭС. При этом учитываются все возможные пути воздействия радиоактивных отходов на человека (внешнее облучение, внутреннее облучение в результате ингаляционного поступления радионуклидов в организм, с водой и по пищевым цепочкам), географические, метеорологические и другие факторы. В соответствии с санитарными правилами (СП) устанавливаются среднесуточный и среднемесячный ДВ радиоактивных газов и аэрозолей в атмосферу (Через трубу высотой 80-150 м) (Табл.6 и 7).

**Табл. 6.** Среднесуточный допустимый выброс

Нуклид	N=1000 МВт (эл)	N = 6000 МВт (эл.)
ИРГ (любая смесь), ТБк/ [МВт (эл.)сут]	18,9	111
<sup>131</sup> I (газовая и аэрозольная фазы), ГБк/[МВт (эл.)сут]	0,37	2,22
Смесь долгоживущих нуклидов (ДЖН), ГБк/[МВт(эл.)•сут]	0,555	3,33
Смесь короткоживущих нуклидов (КЖН), ГБк/[МВт(эл.)сут]	7,4	44,4

**Табл. 7.** Среднемесячный допустимый выброс

Выброс	<sup>90</sup> Sr	<sup>89</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co	<sup>54</sup> Mn	<sup>51</sup> Cr
N= 1000-6000 МВт(эл.), ГБк/ [мес • 1000 МВт (эл.) ]	0,0555	0,555	0,555	0,555	0,555	0,555

N ≥ 6000 МВт (элЛ, ГВт/(месАЭС))	0,333	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
----------------------------------	-------	------	------	------	------	------

При этом предполагают, что этот выброс не приведет на местности к дозе, превосходящей предельно допустимую. Разделение допустимого выброса на среднесуточные и среднемесячные связано с трудностями определения удельной активности ряда радионуклидов (например,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и др.) в пробе выброса, отобранной за одни сутки. Санитарные правила разрешают АЭС однократно превысить в 5 раз среднесуточный допустимый выброс при условии, что суммарный выброс за квартал или за год соответственно не превзойдет соответствующего расчетного значения.

### 3. ОЧИСТКА ГАЗООБРАЗНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ АЭС

#### 3.1 Методы переработки газовых смесей

В настоящее время достаточно хорошо проработаны с научной и технологической точек зрения такие методы разделения газовых смесей, как адсорбция, абсорбция, криогенная дистилляция, мембранные методы и др. Для отделения аэрозолей от чистых газов используется фильтрация. Для избавления от радиоактивных веществ используется метод выдержки, при котором смесь газов выдерживается в некотором сосуде вплоть до полного распада короткоживущих радионуклидов. Используются не только методы выделения и разделения, но и методы конверсии (например, дожигание водорода (как протия, так и трития) для превращения их во взрывобезопасную и легко удаляемую воду).

*Газов очистка* – выделение из газовой смеси при выбросе её в атмосферу различных примесей с целью сохранения нормальных санитарных условий в прилегающих к промышленным объектам районах, подготовки газов к использованию в качестве химического сырья или топлива, а самих примесей – как ценных продуктов. Газоочистку принято подразделять на очистку от взвешенных частиц – пыли, тумана, и от паробразных и газообразных примесей, нежелательных при использовании газов или при выбросе их в атмосферу.

Промышленные методы очистки газов можно свести к трём группам: 1) с помощью твёрдых поглотителей или катализаторов – «сухие методы» очистки; 2) с помощью жидких поглотителей (абсорбентов) – жидкостная очистка; 3) очистка без применения поглотителей и катализаторов. К первой группе относятся методы, основанные на адсорбции, химическом взаимодействии с твёрдыми поглотителями и на каталитическом превращении примесей в безвредные или легко удаляемые соединения. Сухие методы очистки обычно проводят с неподвижным слоем сорбента, поглотителя или катализатора, который периодически должен подвергаться регенерации или замене. В последнее время такие процессы осуществляются также в «кипящем» или движущемся слое, что позволяет непрерывно обновлять очищающие материалы. Жидкостные способы основаны на абсорбции извлекаемого компонентом жидким сорбентом (растворителем). Третья группа методов очистки основана на конденсации примесей и на диффузионных процессах (термодиффузия, разделение через пористую перегородку).

В зависимости от требуемой степени очистки газа различают грубую, среднюю и тонкую очистку. Однако количественные нормы, отвечающие такой классификации, меняются в зависимости от требований технологии. Требуемая степень очистки газа нередко достигается в несколько ступеней, отличающихся условиями или даже способом проведения процесса.

В данной лекции мы рассмотрим лишь те способы переработки газовых смесей, которые нашли применение в ядерной индустрии.

##### 3.1.1 Выдержка

Характерной чертой атомной энергетики и военного ядерного-топливного цикла является присутствие в технологических процессах радиоактивных веществ. Очистка сбросов от некоторых из них включает выдержку для естественного распада радиоактивной примеси (в течение времени, сравнимого с десятью периодами распада радионуклида). Выдержке подвергают непосредственно отходящий газ на протоке или в газгольдерах, либо после предварительной подготовки: сжатия, сжигания, разделения, а также в адсорбционных колоннах.

### 3.1.2 Фильтрация

Содержащиеся в промышленных газах частицы чрезвычайно разнообразны по своему составу, агрегатному состоянию, а также дисперсности. Очистка газов от взвешенных частиц (аэрозолей) достигается механическими и электрическими средствами. Механическую очистку газов производят: воздействием центробежной силы, фильтрацией сквозь пористые материалы, промывкой водой или же другой жидкостью; иногда для освобождения от крупных частиц используют их силу тяжести. Механическую очистку газов обычно проводят методами сухой газоочистки (аппарат циклон), фильтрации и мокрой газоочистки. Электрическая очистка газов применяется для улавливания высокодисперсных частиц пыли или туманов и обеспечивает, при известных условиях, высокий коэффициент очистки. Осаждение аэрозолей осуществляется электрическим полем высокого напряжения (до 50000 вольт), что вызывает ионизацию газа; частицы аэрозолей получают дополнительный заряд и осаждаются на противоположно заряженном электроде.

Здесь мы будем рассматривать лишь метод фильтрации.

На АЭС для удаления аэрозолей (частиц малого диаметра и капель жидкости) из вентиляционного воздуха используют тонковолокнистые фильтры.

**Фильтрация** – разделение суспензий или аэрозолей при помощи фильтров – пористых перегородок (металлических, асбестовых, стеклянных, и др.), пропускающих жидкость или газ, но задерживающих твёрдые частицы.

**Фильтрация** – движение жидкости или газа сквозь пористую среду, например, просачивание воды сквозь грунт основания плотины. В промышленности часто фильтрацию называют фильтрованием.

**Аэрозоли** – дисперсные системы, состоящие из мелких твёрдых или жидких частиц, взвешенных в газовой среде (обычно в воздухе). Аэрозоли, дисперсная фаза которых состоит из капелек жидкости, называется туманами, а в случае твёрдой дисперсной фазы – дымами; пыль относят к грубодисперсным. Размеры частиц в аэрозолях изменяются в очень широких пределах – от нескольких миллиметров до  $10^{-7}$  см.

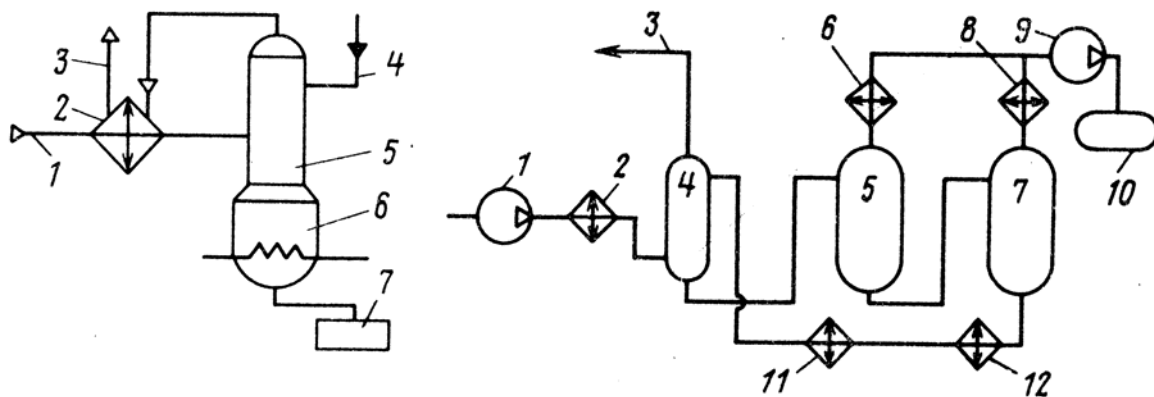
Для фильтрации запылённых газовых потоков используются различные ткани из натуральных или искусственных волокон (хлопок, шерсть, асбест, стекловолокно, базальтовое волокно, лавсан и др.). Фильтры такого типа называются тканевыми (рукавными) фильтрами. Размеры осаждённых частиц пыли в порах ткани и на её поверхности часто во много раз меньше среднего диаметра пор фильтровальной ткани. Это объясняется тем, что осаждение частиц в основном происходит в результате их столкновения с элементами ткани под действием сил инерции, электрических зарядов и других факторов. Однако пока фильтр частично не забит пылью, он мало эффективен по отношению к мелким частицам. Тканевые фильтры служат для улавливания весьма тонких фракций пыли и имеют высокий коэффициент очистки.

Помимо тканевых, применяются фильтры из специального картона, пористой бумаги, ваты, пористой керамики, металлокерамики и др. Конструкции их весьма разнообразны. Некоторые из них не имеют приспособлений для периодического удаления пыли, и при достижении определённой величины гидравлического сопротивления фильтрующий материал заменяется. Удаление пыли из некоторых фильтров производится периодической обратной продувкой или промывкой, чаще всего водой. Для повышения эффекта пылеулавливания фильтры с насадкой из крупных материалов (керамических и металлических колец, гофрированной стальной сетки и др.) смачивают минеральным маслом.

Промышленные фильтры подразделяются на аппараты периодического и непрерывного действия, а также по признаку направлений движения фильтрата и действия силы тяжести. Эти направления могут совпадать, быть противоположными или взаимоперпендикулярными.

### 3.1.3 Криогенная дистилляция

В методе криогенной дистилляции, смесь газов, путём глубокого охлаждения, переводят в жидкость, которую подвергают дистилляции, т.е. разгонке на фракции. После чего температуру повышают и переводят жидкости в газы.



**Рис.2 Слева:** Принципиальная схема криогенной дистилляционной установки. 1 – вход смеси газов; 2 – холодильник; 3 – сброс очищенного газа; 4- подача жидкого азота; 5 – дистилляционная колонка; 6 – низкотемпературная часть колонки; 7 – сосуд выдержки

**Справа:** Принципиальная схема очистки от радиоактивных благородных газов абсорбцией в жидкости: 1, 9 – компрессор; 2 – охладитель газа; 3 – сброс чистого газа; 4 – смеситель РБГ и фреона; 5 – ректификационная колонка; 6, 8 – охладители; 7 – десорбционная колонка; 10 – газгольдер хранения РБГ; 11, 12 – охладители фреона

**Дистилляция** – разделение многокомпонентных смесей на отличающиеся по составу фракции; основано на различии в составах жидкости и образующегося из неё пара. Осуществляется путём частичного испарения жидкости и последующей конденсации пара. Полученный конденсат обогащён низкокипящими компонентами, остаток жидкой смеси – высококипящими.

### 3.1.4 Абсорбция

**Абсорбция** – объёмное поглощение газов или паров жидкостью (абсорбентом) с образованием раствора. В промышленности осуществляют в абсорберах (прежнее название – скрубберы), имеющих развитую поверхность соприкосновения абсорбента с поглощаемым веществом.

**Сорбция** – поглощение газов, паров и растворённых веществ твёрдыми телами и жидкостями. Различают: 1) адсорбцию – поглощение поверхностью твёрдого тела или поглощение на границе раздела жидкость-жидкость или жидкость-газ (пар); 2) абсорбцию – объёмное поглощение жидкостью или твёрдым телом; 3) хемосорбцию – поглощение с образованием химического соединения; 4) капиллярную конденсацию, выражающуюся в образовании жидкой фазы в порах и капиллярах поглотителя.

Абсорбция – один из случаев сорбции. В отличие от адсорбции, при абсорбции поглощение веществ происходит во всём объёме поглотителя. Поглощение вещества может быть осложнено химическим взаимодействием поглощаемого вещества с поглотителем (хемосорбция).

По характеру поверхности соприкосновения фаз абсорберы можно разделить на поверхностные, плёночные, барботажные и распыливающие. Особую группу составляют механические абсорберы, в которых развитие поверхности соприкосновения достигается действием вращающихся деталей.

Типичная схема жидкостных способов очистки включает непрерывную циркуляцию абсорбента между аппаратом, в котором происходит очистка газа, и регенератором, в котором происходит восстановление поглотительной способности раствора. В барботажных абсорберах газ распределяется в жидкости в виде пузырьков и струй, на поверхности которых происходит абсорбция. Наиболее распространены абсорберы в виде колонн с колпачковыми и ситчатыми тарелками. Газ проходит через слой жидкости, уровень которой поддерживается переливными трубами. В плёночных абсорберах газ соприкасается с жидкостью, движущейся в виде тонкой плёнки. Наиболее распространены насадочные абсорберы, представляющие собой колонны, загруженные насадкой – твёрдыми телами различной формы (из керамики, стекла, фарфора и др. материалов), по поверхности которых стекает жидкость.

### 3.1.5 Адсорбция

*Адсорбция – поглощение газов, паров и жидкостей поверхностным слоем твёрдого тела (адсорбента) или жидкости.*

Адсорбция представляет собой концентрирование вещества (адсорбата, адсорбтива) из объёма фаз на поверхности раздела между ними, например, из газа или раствора на поверхности твёрдого тела (адсорбента) или жидкости. Адсорбция происходит под влиянием молекулярных сил поверхности адсорбента и ведёт к уменьшению свободной поверхностной энергии. Физическая адсорбция результат действия дисперсионных или электростатических сил. При этом молекулы адсорбата сохраняют свою индивидуальность. Если адсорбция сопровождается химической реакцией поглощаемого вещества с адсорбентом, то она называется хемосорбцией.

*Адсорбенты – высокодисперсные искусственные и природные тела с большой наружной (непористые) или внутренней (пористые) поверхностью, на которой происходит адсорбция веществ из соприкасающихся с ней газов или растворов.*

*Сорбенты – твёрдые вещества или жидкости, применяющиеся для поглощения газов, паров и растворённых веществ. Наиболее широкое распространение имеют: активный уголь, силикагель, алюминия окись, цеолиты. Особое место занимают синтетические ионообменные смолы, представляющие собой нерастворимые в воде органические полиэлектролиты. Жидкие сорбенты применяются в химической промышленности и в качестве поглощающей фазы в газожидкостной хроматографии.*

Адсорбционные свойства адсорбента определяются природой твёрдого тела, химическим составом и состоянием поверхности, степенью её химической и геометрической неоднородности, величиной удельной поверхности, размерами и характером транспортной связности пор. Адсорбенты обычно имеют большую удельную поверхность: активные окиси и гидроокиси (силикагели, алюмогели и др.) – от 10 до 1000 м<sup>2</sup>/г, активные угли – до 1000 м<sup>2</sup>/г.

**Активный (активированный) уголь** – пористый адсорбент, скелет которого построен из рыхлых и неправильно построенных пачек, состоящих из сеток 6-членных углеродных колец, менее упорядоченных, чем в графите, и ковалентно связанных с углеродными радикалами, с водородом, а часто и с кислородом.

Активированный уголь сильно адсорбирует органические вещества – углеводороды, слабее – низшие спирты, аммиак и особенно плохо – воду. Обычно активированные угли обладают неоднородной поверхностью и пористостью. Различают микропоры размером 10-20Å с сильно развитой поверхностью (до 1000 м<sup>2</sup>/г), поры переходных размеров (50-500Å) с поверхностью до 100 м<sup>2</sup>/г и макропоры с размерами более 1000Å и малой поверхностью (около 1 м<sup>2</sup>). Сильная адсорбция происходит в микропорах. В порах переходных размеров происходит полимолекулярная адсорбция и капиллярная конденсация паров. Макропоры служат в основном транспортными каналами, подводящими молекулы газа к внутренним частям зёрен. Обычно размерный спектр пор в активированном угле имеет 2 – 3 чётких максимума.

**Алюминия окись для хроматографии** мелкокристаллический порошок плотностью 2,55 размер зёрен 10-30 мк; величина удельной поверхности для различных сортов колеблется в пределах от 170 до 300 м<sup>2</sup>/г.

**Алюмогель** – аморфный оксид алюминия, микропористое вещество. Получают высушиванием геля гидроксида алюминия.

**Алюмосиликаты** – группа порообразующих минералов, класса силикатов; алюмокремниевых соединений с катионами щёлочных металлов (полевые шпаты, слюды, минералы глин, и др.). Отдельную группу алюмосиликатов образуют **цеолиты**, состав которых может быть выражен формулой  $M_xE_yO_{2y} \cdot nH_2O$  где M – Ca, Na реже Ba Sr K, а Э - Si Al в переменных отношениях. Цеолиты обладают рыхлой кристаллической структурой и способны обменивать содержащуюся в них воду на другие жидкости (спирт, аммиак), а катионы M – на различные другие катионы. Цеолитная вода ведёт себя как сорбированная, причём даже полное обезвоживание не ведёт к разрушению основной структуры минерала.

**Цеолиты** – алюмосиликаты, кристаллическая структура которых образована тетраэдрическими фрагментами  $\text{SiO}_4^{4-}$  и  $\text{AlO}_4^{5-}$ , объединёнными общими вершинами в трёхмерный каркас, пронизанный полостями и каналами. В последних находятся молекулы воды и катионы металлов, аммония и др. Способны селективно выделять и вновь впитывать различные вещества, например, воду, а также обменивать катионы. Встречаются в природе, получают искусственно. Адсорбенты, ионообменники, молекулярные сита.

**Силикагель** – микропористое тело, получаемое прокаливанием геля поликремниевой кислоты, состоит из  $\text{SiO}_2$ . Получают приливанием к раствору силиката натрия кислоты. Готовый технический силикагель представляет собой твёрдые хрупкие полупрозрачные или меловидные зёрна белого или желтоватого цвета. Силикагель можно получать и в виде шарообразных гранул. Силикагель – сорбент с высокоразвитой капиллярной структурой, обусловленной тем, что скелет геля состоит из мельчайших (около 100 А) шарообразных частиц двуокси кремния. Характер структуры зависит от режима приготовления: различают мелкопористые и крупнопористые силикагели. Силикагель является гидрофильным сорбентом и применяется главным образом для поглощения водяных паров, конденсирующихся в его капиллярах. Силикагель поглощает также пары органических жидкостей – спирта, ацетона, бензола и др. и находит применение в процессах рекуперации летучих растворителей. Силикагели используются для адсорбционной очистки органических жидкостей и в хроматографии. Крупнопористый силикагель может служить носителем для многих катализаторов (Pt, Ni и др.).

При постоянной температуре физическая адсорбция увеличивается с ростом давления газа или концентрации раствора. С ростом температуры физическая адсорбция уменьшается. Физическая адсорбция обратима, она уменьшается с уменьшением концентрации адсорбата, хемосорбция обычно необратима. Физическая адсорбция паров часто сопровождается капиллярной конденсацией вещества в порах адсорбента. В области капиллярной конденсации адсорбция необратима (имеет место сорбционный гистерезис). Обычно адсорбция сопровождается выделением тепла. Изотермы адсорбции графически выражают зависимость адсорбции от равновесного давления газа (или равновесной концентрации раствора) при постоянной температуре. В зависимости от интенсивности силового поля на поверхности адсорбента и при различных внешних условиях могут образовываться адсорбционные слои в одну (мономолекулярная адсорбция), две или несколько молекул (полимолекулярная адсорбция). Для математического описания изотерм адсорбции предложены разные формулы: Генри, Ленгмюра, Киселёва, БЭТ, Дубинина-Астахова, Фрейндлиха и др. Кинетика адсорбции зависит от его концентрации в объёмной фазе, температуры, химической природы и геометрической структуры адсорбента, природы и концентрации других веществ в объёме и на поверхности.

В промышленности адсорбцию осуществляют в специальных аппаратах – адсорберах. Известны адсорберы периодического действия (газ и пар поступают попеременно) и адсорберы с кипящем слоем адсорбента.

*Десорбция* – процесс удаления адсорбированного вещества с поверхности адсорбента. Десорбция обратна адсорбции.

Десорбция вызывается уменьшением концентрации адсорбируемого вещества в окружающей адсорбент среде или повышением температуры. Десорбция применяется в промышленности для извлечения из адсорбентов поглощённых ими газов, а также с целью регенерации адсорбента, для чего адсорбенты обрабатывают продуванием горячего водяного пара, воздуха или промывают чистым растворителем (регенерация). Скорость десорбции зависит не только от температуры и скорости тока десорбируемого газа (и его природы), но и от особенностей структуры адсорбента, т.к. в узких порах перенос десорбируемого вещества затруднён. Часто при десорбции проявляется гистерезис сорбционный, причиной которого в области мономолекулярного покрытия поверхности являются химические реакции с поверхностью, а в области высоких давлений пара – капиллярная конденсация и набухание.



**Гистерезис сорбционный** – явление неполной обратимости процесса адсорбции, удерживание большего количества адсорбированного вещества пористыми телами при десорбции, чем при адсорбции.

При гистерезисе изотермы адсорбции и десорбции не совпадают, т.е. одному и тому же давлению пара соответствуют различные величины поглощения при прямом и обратном ходе процесса. Две несовпадающие ветви изотерм адсорбции и десорбции образуют гистерезисную петлю. Причиной гистерезиса может быть капиллярная конденсация пара в открытых порах, а также химическая реакция молекул газа с поверхностью адсорбента или медленное обратное выделение после растворения их в веществе адсорбента (набухание).

**Хемосорбция** – поглощение газов твёрдыми или жидкими поглотителями, сопровождающееся образованием химических соединений. Скорость хемосорбции растёт с ростом температуры. Скорость и количество поглощённого вещества растут с ростом концентрации поглощаемого вещества в растворе или в парах и часто зависят от геометрической структуры сорбента и скорости перемешивания, определяющих диффузию молекул к поверхности или в объём поглотителя.

### **3.2 Промышленные системы газоочистки**

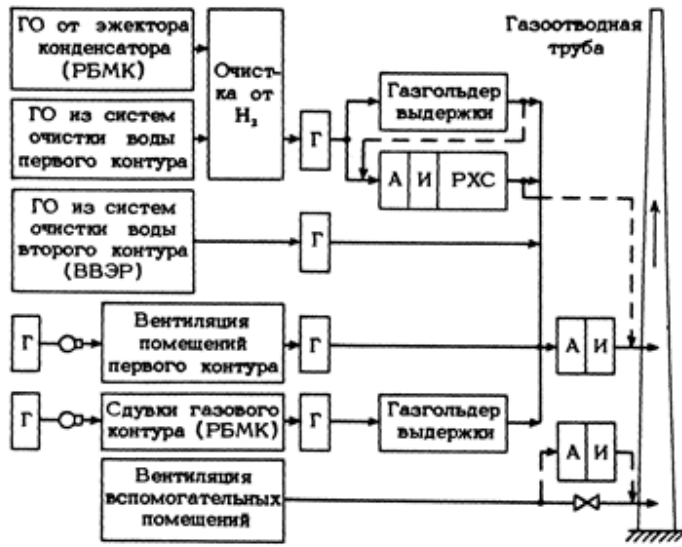
При принятии решения об очистке технологических газов рассматривают вопросы экономики и защиты окружающей среды и человека. На АЭС нашли применение преимущественно способы, основанные на адсорбции и выдержке, поскольку обезвреживанию подлежат в основном радионуклиды инертных газов. Для удаления трития применяют каталитическое сжигание. Мы ограничимся рассмотрением очистки технологических газов АЭС в основном от радионуклидов криптона, ксенона и иода.

В настоящее время нашли применение два способа удаления криптона и ксенона из технологических газов АЭС: адсорбция на активированном угле и криогенная дистилляция. Во всех вариантах используемых методов для совершенствования технологии процесса, обеспечения или повышения его безопасности приходится предварительно удалять некоторые вредные и мешающие примеси: водяные пары, метан, окислы азота, углекислый газ, озон, кислород, водород. Узлы и аппараты, используемые для такой предварительной подготовки газа, часто составляют большую часть таких систем, ограничивают значения таких основных параметров, как производительность и эффективность очистки.

#### **3.2.1 АЭС с реактором ВВЭР**

Для очистки отходящих газов АЭС с реактором ВВЭР используется адсорбционный метод очистки, в частности способ динамической адсорбции радионуклидов криптона и ксенона в колонне, работающей в режиме непрерывного потока. Она обеспечивает очистку в  $10^2 - 10^4$  раз, что позволяет поддерживать активность газовых выбросов АЭС значительно ниже норм, установленных санитарными правилами.

Для поддержания норм качества теплоносителя и очистки его от различных примесей часть теплоносителя выводится из контура и направляется в системы очистки. В состав таких систем входят фильтры, дегазаторы, выпарные установки, деаэраторы. Дегазированный теплоноситель возвращают в первый контур, а радиоактивные газы и аэрозоли направляют в специальные емкости выдержки или системы очистки. Кроме того, газообразные отходы возникают в результате дегазации разного рода протечек теплоносителя, при водообмене в реакторе и при отборе проб воды в бассейнах выдержки. Газообразные и аэрозольные отходы из монтажных пространств, боксов парогенераторов и насосов, защитных кожухов оборудования, емкостей с жидкими отходами выводят с помощью вентиляционных систем. Эти отходы перед выбросом в вентиляционную трубу очищаются на аэрозольных и иодных фильтрах.



**Рис. 3.** Схема обработки и удаления газообразных продуктов на АЭС с реактором типа ВВЭР или РБМК;

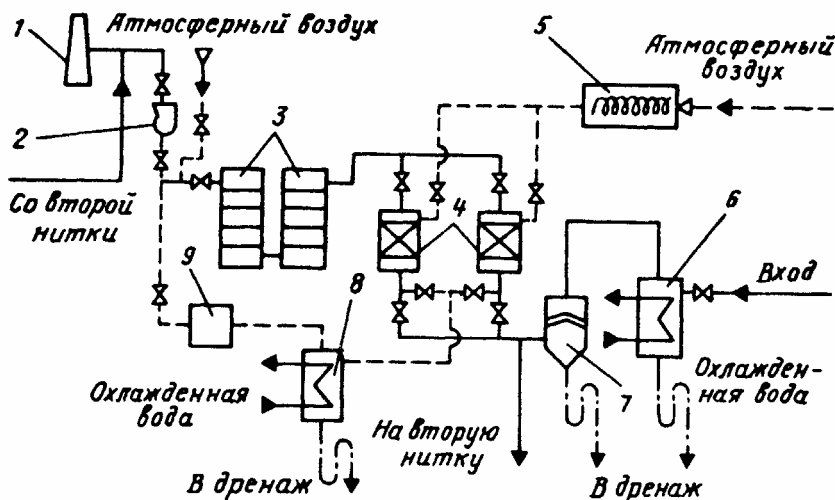
Г — фильтр грубой очистки; А (И) — аэрозольный (йодный) фильтр; РХС — радиохроматографическая система очистки газов

Отводимые от технологического оборудования газы состоят из азота с примесью водяного пара, водорода, газообразных продуктов деления. Объем этих газов равен 4-70 м<sup>3</sup>/ч для реакторов типа ВВЭР, в которых первый контур замкнут и герметичен. Время пребывания в нем радиоактивных веществ намного больше, чем в разомкнутом первом контуре кипящего реактора типа РБМК,

т.к. расход воды из первого контура реактора типа ВВЭР в систему очистки с учетом протечек мал: 20 - 50 т/ч. Поэтому период полувыведения радиоактивных газов из первого контура большой: часы и даже сутки. Дезактивацию технологических газов осуществляют в камерах выдержки или на специальных установках, имеющих фильтры с активированным углем. При выдержке в камерах газов с высокой концентрацией водорода возможно образование взрывоопасной гремучей смеси. Для устранения этого газы разбавляют азотом, что, однако, увеличивает габариты камер. Сократить объем дезактивируемых газов можно за счет сжигания водорода.

Схема обработки и удаления газообразных отходов АЭС с реакторами типа ВВЭР и РБМК приведена на **Рис.2**.

В качестве примера рассмотрим схему установки очистки газообразных отходов АЭС с реактором с водой под давлением, спроектированной в СССР для финской АЭС "Ловица". На этой станции источники газообразных отходов подключены к циркуляционному газовому контуру. В контуре в специальном аппарате с платиновым катализатором дожигается радиолитический водород. Из циркуляционного контура газ поступает в систему газоочистки, которая состоит из трех параллельных взаимозаменяемых ниток. Одна нитка работает постоянно, другая принимает на себя газ эпизодически в процессе дренирования первого контура, когда наблюдается



повышенное газовыделение, третья нитка - резервная.

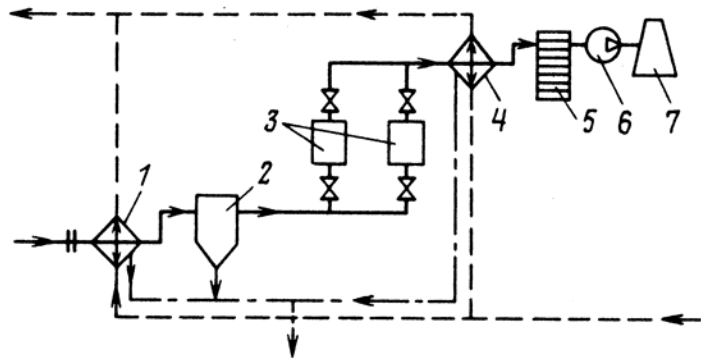
На **Рис. 4** представлена технологическая схема одной из ниток, которая

**Рис. 4.** Принципиальная технологическая схема установки газоочистки финской АЭС «Ловица» (реактор ВВЭР)

включает в себя фильтр-адсорбер 3, заполненный активированным углем, и узел осушки. Адсорбер рассчитан на работу при температуре окружающей среды.

В системе газоочистки третьего и четвертого блоков Нововоронежской АЭС и первой очереди Кольской АЭС рабочий объем адсорбера 20 м<sup>3</sup>. Время прохождения хроматографического фронта инертных газов через адсорбер в нормальном режиме составляет 42 сут. для ксенона и 3,6 сут. для криптона. Рабочий объем адсорбера в системе газоочистки АЭС "Ловица" 40 м<sup>3</sup>, а время прохождения хроматографического фронта криптона 10 сут, что с избытком обеспечивает заданный коэффициент очистки.

Вместимость адсорбера по иоду и его соединениям очень велика. Поэтому система практически полностью адсорбирует радиоактивный <sup>131</sup>I.



**Рис.5** Принципиальная схема радиохроматографической газовой системы ВВЭР-440. 1, 4 – теплообменник; 2 – влагоохладитель; 3 – цеолитовые адсорберы; 5 – угольные адсорберы; 6 – газодувка; 7 – вентиляционная труба.

Узел очистки состоит из теплообменника 6, где газ охлаждается до минимально возможной по условиям эксплуатации температуры, самоочищающегося аэрозольного фильтра 7, где газ освобождается от капельной влаги, и двух цеолитовых колонн 4, предназначенных для глубокой осушки газа. Аэрозольный фильтр работает непрерывно в режиме самоочистки. Цеолитовые колонны включаются поочередно. Когда в одной колонне происходит осушка газа, другая регенерируется или находится в резерве. Переключение цеолитовых колонн выполняется по сигналу влагометра. Остаточное влагосодержание осушенного газа не превышает 0,1 г/м<sup>3</sup>.

Регенерация цеолитовых колонн осуществляется нагретым атмосферным воздухом. Для этого в системе предусмотрен электронагреватель 5, вход которого оборудован аэрозольным фильтром. Во время регенерации нагретый воздух подается в колонну в направлении, противоположном рабочему ходу газа в режиме сушки. Регенерация заканчивается после того, как температура воздуха на выходе цеолитовой колонны достигает заданного значения.

Для осушки газа от влаги предусматривают три адсорбера, работающие в следующем режиме: один работает, второй регенерируется, третий - в резерве. Момент отключения адсорбера на регенерацию определяется по показаниям прибора, измеряющего влажность газа на выходе из адсорбера. Регенерацию адсорбера осуществляют продувкой через адсорбер атмосферного воздуха, нагретого до температуры 620 - 650К, и заканчивают, если температура цеолита достигает 573К. Время регенерации при указанной температуре равно 2 - 3 часа.

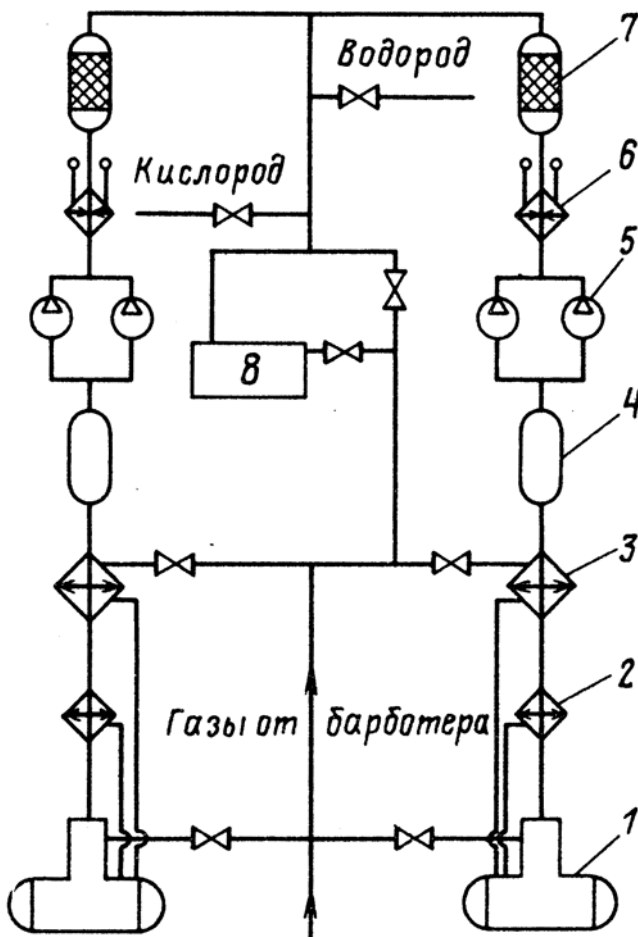
При относительно простой технологии осушки газовых смесей цеолитовыми адсорберами и небольших капитальных затратах на её осуществление адсорбционный способ имеет ряд существенных недостатков. Так, например, в процессе эксплуатации гранулы цеолита измельчаются, уменьшается их влагоёмкость. Это требует замены цеолита. Кроме того, на цеолите сорбируются твёрдые продукты распада РБГ, что приводит к росту полей  $\gamma$ -излучения от оборудования. Цеолит необходимо охлаждать в режиме осушки и после регенерации. В технологии осушки газовой смеси имеются высокотемпературные (до 570К) режимы без использования тепла регенерации.

Первые два недостатка приводят к увеличению твёрдых радиоактивных отходов на АЭС и ухудшению условий обслуживания и ремонта указанного оборудования. Размельчение цеолита требует включения в схему противопыльных фильтров. Цеолитовый узел осушки и узел адсорбции РБГ углем работают в противоположных температурных режимах. Процесс адсорбции газа углем требует понижения температуры, процесс осушки газовой смеси цеолитом

сопровождается выделением тепла. Необходимость периодического разогрева цеолита до 570К для регенерации и последующего охлаждения в режиме осушки газовой смеси существенно усложняет схему узла осушки.

Чтобы в газодувку 2 не поступали горячий воздух и радиоактивный иод, линия регенерации оборудована теплообменником 8 и иодным фильтром-адсорбером 9. Влагоотделитель теплообменников 6, 8 и самоочищающегося фильтра 7 имеют дренажи для слива конденсата. Чтобы газ не перетекал по дренажному трубопроводу от одного аппарата в другой, в дренажных линиях предусмотрены индивидуальные гидрозатворы.

Система газоочистки АЭС призвана не только осушать газы и удалять радионуклиды, но и избавляться от взрывоопасных газов (например, водорода), превращая их в безобидные вещества (например, в воду). Водород сжигают на катализаторах в контактных аппаратах. Наиболее важной и трудной технической задачей, решаемой при конструировании контактного аппарата, является обеспечение заданной температуры в зоне реакции. Это обусловлено тем, что теплопроводность зёрнёного слоя катализатора мала, и поэтому всегда тепловыделение по длине слоя неравномерно. В большинстве промышленных контактных аппаратов химической промышленности для поддержания определённой температуры в нём тепло отводят из зоны реакции.



Конструктивно контактный аппарат выполняют в виде теплообменника с катализатором в трубах и теплоносителем в межтрубном пространстве. Преимущество такой конструкции контактного аппарата – хорошие условия для отвода тепла от катализатора. При небольших диаметрах труб с катализатором и достаточно высокой скорости газового потока в них создаются необходимые условия для передачи тепла реакции к стенке и, следовательно, его отвод теплоносителем.

**Рис.6** Установка сжигания водорода АЭС ВВЭР-440: 1 – деаэратор, 2 – конденсатор выпара, 3 – холодильник газа; 4 – буферная ёмкость; 5 – газодувка; 6 – электронагреватель; 7 – контактный аппарат, 8 – бак протечек первого контура.

На ВВЭР-440 очистка газов от водорода производится на узле сжигания водорода (УСГС). На контактный аппарат поступает газовая смесь, где основным компонентом является азот, а содержание воды незначительно. Поэтому в некоторых режимах для сжигания водорода подаётся кислород, дозируемый автоматически в зависимости от количества поступающего водорода. Допускается режим с повышенным расходом кислорода. В этом случае дополнительно подаётся водород. Особенность схемы этой

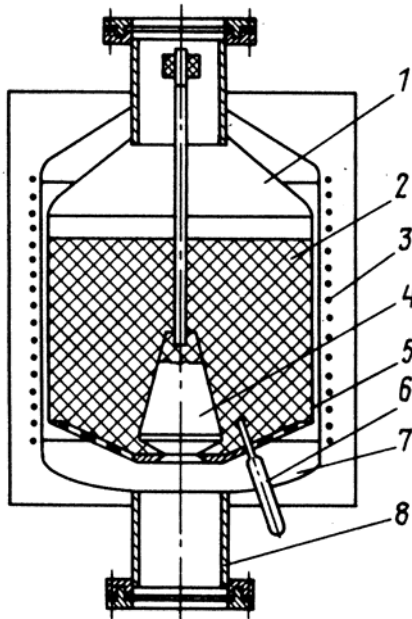
установки в том, что по замкнутому технологическому контуру (газодувка – электронагреватель – контактный аппарат – холодильник газа – газодувка) циркулирует азот с расходом 200 м<sup>3</sup>/ч. Это

обеспечивает взрывобезопасность газовой смеси при максимальном поступлении водорода. Избыток азота после сжигания водорода направляют на угольные адсорберы.

В качестве катализатора используют шариковый платиновый катализатор ШПК-2, в последнее время больше применяют катализатор марки ОПК-2, содержащий меньше хлора.

Контактный аппарат в этой установке имеет электронагреватель, который постоянно поддерживает аппарат в горячем состоянии на резервной нитке.

Установка сжигания водорода для АЭС с ВВЭР-440 наиболее отработана, режимы её полностью автоматизированы. Концентрация водорода снижается с 2,5% объемных на входе в контактный аппарат до 0,02% после него.



**Рис.7** Контактный аппарат для сжигания водорода на ВВЭР-440: 1 – эллиптическое днище; 2 – катализатор; 3 – электронагреватель; 4 – запорное устройство; 5 – корзина; 6 – термометр; 7 – корпус; 8 – штуцер

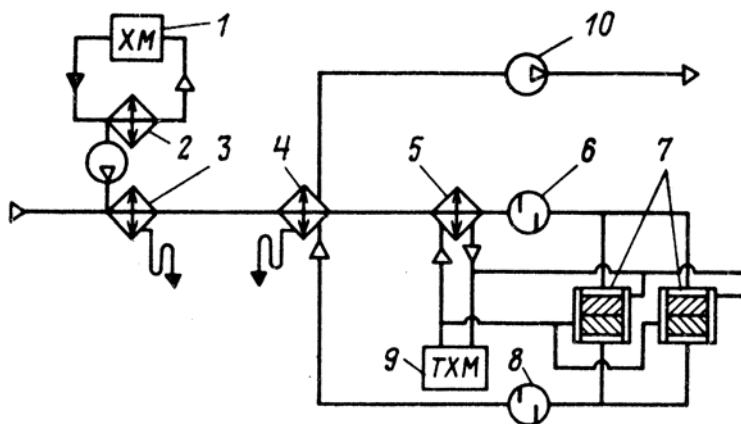
Указанная система может использоваться для очистки газообразных отходов и в аварийных ситуациях. В России подобная система типична для всех АЭС с ВВЭР.

### 3.2.2 АЭС с реакторами РБМК

Объем отводимых от технологического оборудования газов для реакторов типа РБМК составляет 300 - 350 м<sup>3</sup>/ч – во много раз больше, чем для реактора ВВЭР. На АЭС с реакторами кипящего типа (одноконтурными) время пребывания большей части радиоактивных газообразных продуктов деления (около 95%) в теплоносителе не превышает нескольких десятков секунд (не более 30 с). Вместе с продуктами радиолитиза воды они в виде парогазовой смеси выбрасываются из конденсатора турбин и направляются в систему спецгазоочистки или

газгольдер выдержки.

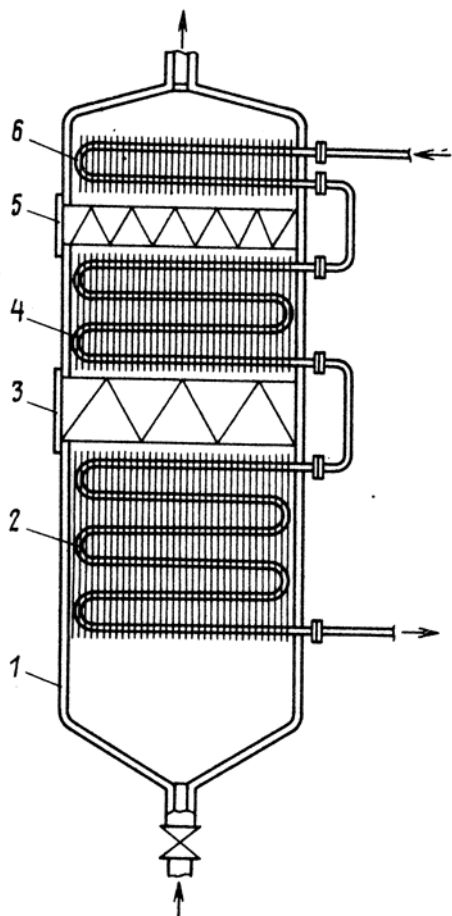
В схеме установки для очистки сбросных газов кипящего реактора типа РБМК использован конденсационный способ очистки газа. Он более экономичен, что для кипящих реакторов важно ввиду значительного объема отходящих радиоактивных газов. Сначала влагу конденсируют в парожекторе холодильнике до точки росы, близкой к температуре 273К, а затем вымораживают в газоохладителе. Источником холода служит одноступенчатая фреоновая холодильная машина. Сухой и охлажденный газ подают в угольные адсорберы, причем сначала в головной адсорбер с малым объемом угля. Назначение головного адсорбера – предотвратить попадание влаги и радиоактивных аэрозолей в основной адсорбер.



**Рис.8** Принципиальная схема РХГС РБМК. 1 – холодильная машина; 2 – теплообменник; 3 – регенеративный газоохладитель; 4 – вымораживатель влаги; 5 – фильтр для улавливания аэрозольного снега; 6 – угольные адсорберы; 7 – фильтр; 8 – турбохолодильная машина; 9 – газодувка; 10 – газодувка

В составе системы очистки газообразных отходов АЭС угольная колонна может быть использована в режиме до проскока, **рециркуляром**

режиме и в режиме "вечной" колонны.



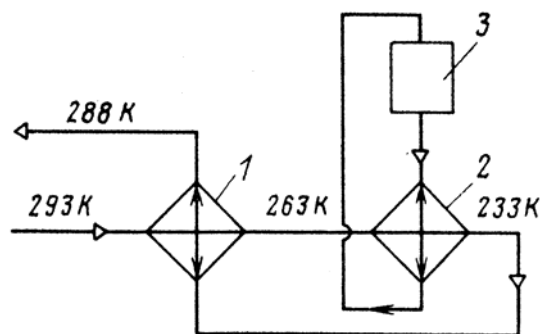
**Режим работы до проскока.** Наиболее высокая степень очистки газа от удаляемого компонента может быть достигнута, если использовать попеременно работающие колонны. Одна находится в работе, другая - регенерируется. Цикл регенерации должен быть короче рабочего, либо в работу включают резервную колонну. В рабочем цикле колонна работает до момента появления компонента в регистрируемом приборами количестве или концентрации.

**Рис.9** Вымораживатель. 1 – корпус, 2, 4, 6 – поверхность охлаждения до 220, 213, 200К; 3, 5 – фильтры из стекловолокна.

На АЭС режим работы угольных фильтров до проскока используют в двух случаях. При очистке газообразных, технологических отходов для достижения максимальной очистки газов, сбрасываемых в атмосферу, например, на кипящих реакторах и реакторах с водой под давлением. В быстрых реакторах газообразных отходов из первого контура практически нет или они чрезвычайно малы (неорганизованные протечки из газовой системы). Но необходимость в очистке газовой подушки реактора есть. Ее очищают либо периодически, перед остановом на планово-предупредительный ремонт, либо непрерывно. При периодической очистке также используется режим работы адсорберов до проскока, но с возвратом очищаемого газа в газовую систему реактора.

**Режим "вечной" работы колонны.** В этом режиме используют то обстоятельство, что многие радионуклиды криптона и ксенона имеют достаточно короткие периоды полураспада в сравнении с временем движения вещества по колонне. Каждый нуклид распадается за некоторое среднее время движения по колонне до уровня, зависящего от его постоянной распада. Можно показать, что эффективность угольной колонны: коэффициент очистки от радиоактивных газообразных продуктов, объем угля в адсорберах в рассматриваемом режиме определяются равновесным коэффициентом адсорбции.

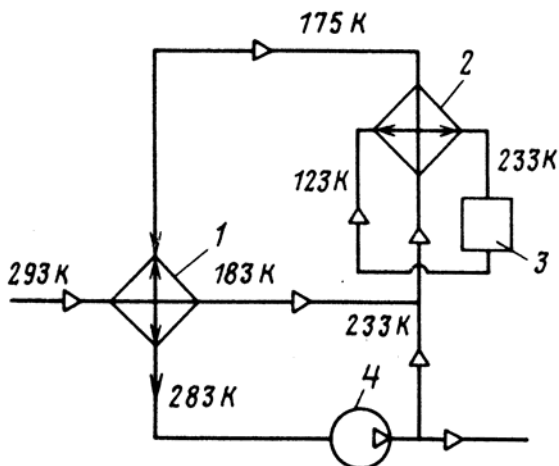
Осушка газов на реакторе РБМК представляет собой более сложную задачу, чем на реакторе ВВЭР. Для АЭС с кипящим реактором с большим расходом технологических сдувок (до  $500 \text{ м}^3/\text{г}$ ) и значительной влажностью газа ( $20 - 30 \text{ г}/\text{м}^3$ ) применение осушки газа при помощи цеолитовых адсорберов технически нецелесообразно и экономически не выгодно.



**Рис.10** Регенеративная схема вымораживания: 1 – регенеративный газоохладитель; 2 – основной газоохладитель; 3 – холодильная машина.

Осушку газовой смеси можно проводить за счёт конденсации влаги при охлаждении. При положительной температуре процесса сконденсированная влага удаляется постоянно, а при отрицательной температуре выморозенная влага осаждается в виде инея на охлаждающей поверхности. Удаляют иней с

охлаждающей поверхности, оттаивая его при помощи горячего воздуха, подаваемого в газоохладитель. Количество отложившейся влаги в виде инея на охлаждающей поверхности ограничено, поэтому чем больше газ осушается при положительной температуре, тем меньше нагрузка на вымораживатель, тем благоприятнее происходит процесс вымораживания влаги.



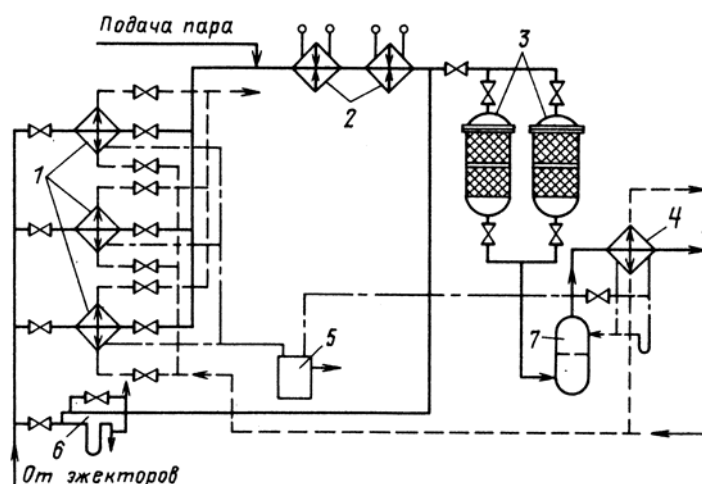
**Рис.11** Регенеративная схема вымораживания с рециркуляцией газа

Технической водой из оборотного водоснабжения можно охладить газ до температуры 305 – 313К и осушить его таким образом до влажности 35 – 40 г/м<sup>3</sup>. Охлаждение до температуры 285К проводят при помощи фреоновой холодильной машины. Предварительную осушку технологических газовых сдувок АЭС

необходимо проводить, снижая их температуру до 273К. Для улавливания частиц инея при охлаждении ниже 223К необходимо устанавливать фильтры внутри вымораживателя. Следует учитывать, что в вымораживателе одновременно с выведением из газового потока влаги происходит его очистка от твёрдых продуктов распада РБГ, и нелетучих форм иода. При оттаивании они переходят в конденсат.

Для обеспечения перепада температур 3 – 5К между температурой газа и температурой стенки в воздухоохладителе по всей охлаждающей поверхности наиболее экономична регенеративная схема вымораживания. В этом случае расход энергии в 8-10 раз меньше, чем при выпуске охлаждающего газа наружу. При большом содержании паров воды (более 5 г/м<sup>3</sup>) в газовом потоке часть холода расходуется на конденсацию пара, поэтому необходим дополнительный источник холода. В технологических схемах между холодильником-

вымораживателем и регенеративным газоохладителем устанавливают угольные адсорберы, которые дополнительно охлаждают хладагентом от того же источника холода.



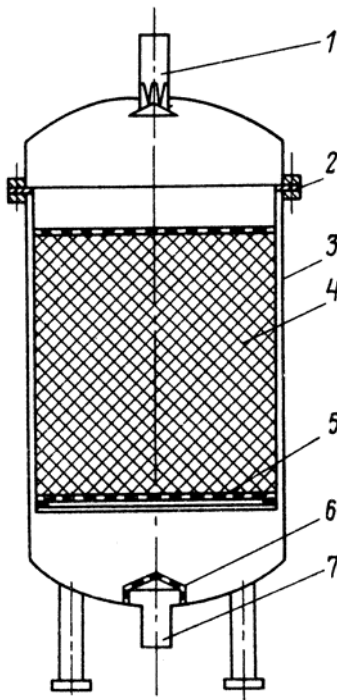
**Рис.12** Установка сжигания водорода АЭС РБМК: 1 – конденсатор; 2 – электронагреватель; 3 – контактный аппарат; 4 – теплообменник; 5, 6 – гидрозатвор; 7 – барботажная колонка.

На РБМК вымораживание влаги и охлаждение угольных адсорберов осуществляют с помощью холодного

воздуха. Охлаждение воздуха в УПАК осуществляют воздушной турбохолодильной машиной.

Сжигание водорода на РБМК проводится на контактных аппаратах ёмкостного типа, обладающих низким динамическим сопротивлением. Парогазовая смесь, состоящая из рабочего пара соплового аппарата 3-ей ступени основного эжектора турбины, воздуха, присасываемого в конденсатор турбины, и продуктов радиолитического распада воды в реакторе (водород, кислород), поступает в электронагреватель 2. Для поддержания взрывобезопасной концентрации водорода в парогазовую

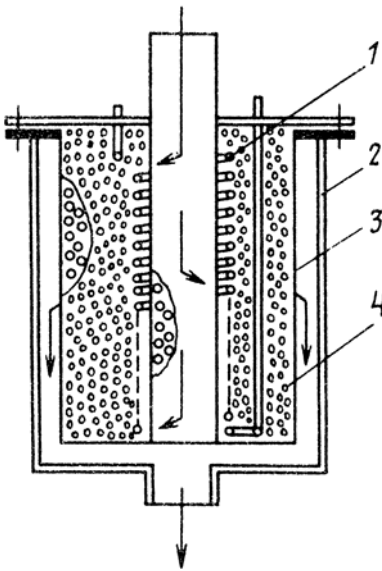
смесь перед электронагревателем подаётся пар. В электронагревателе эта парогазовая смесь нагревается до температуры 413К и поступает в контактный аппарат. В постоянной работе используют один аппарат, другой находится в резерве. Из контактного аппарата парогазовая смесь с температурой 620К поступает в барботажную колонку, где при прохождении пара через слой конденсата конденсируется основная доля пара. Охлаждение неконденсируемых газов с 373 до 313К осуществляется в теплообменнике 4. Слив конденсата с конденсаторов и теплообменника производят через гидрозатвор в конденсатор турбины. На этой установке сжигается до 50 м<sup>3</sup>/ч водорода. После контактного аппарата концентрация водорода не превышает 0,03% объёма.



**Рис.13** Контактный аппарат АЭС РБМК: 1, 7 – штуцеры; 2 – корзина; 3 – корпус; 4 – катализатор; 5 – днище корзины; 6 – колпак перфорированный.

Конструкционно, контактный аппарат представляет собой сосуд с эллиптическими днищами. Для уменьшения температурных напряжений, связанных с резким приростом температуры в небольшом по высоте слое катализатора, последний размещают внутри специальной корзины. Между корзиной и корпусом контактного аппарата имеется зазор. Регулирование температуры осуществляют изменением концентрации водорода паром,

подаваемым перед электронагревателем. Температура в контактном аппарате возрастает за счёт тепловыделения при сгорании водорода. При адиабатическом сгорании 1% (объёмного) водорода температура парогазовой смеси возрастает на 70К. поэтому с учётом допустимой температуры катализатора ОПК-2, равной 670К, содержание водорода в парогазовой смеси должно быть не более 3%.



**Рис.14** Контактный аппарат УПАК-II для быстрого реактора

### 3.2.3 АЭС с быстрыми реакторами

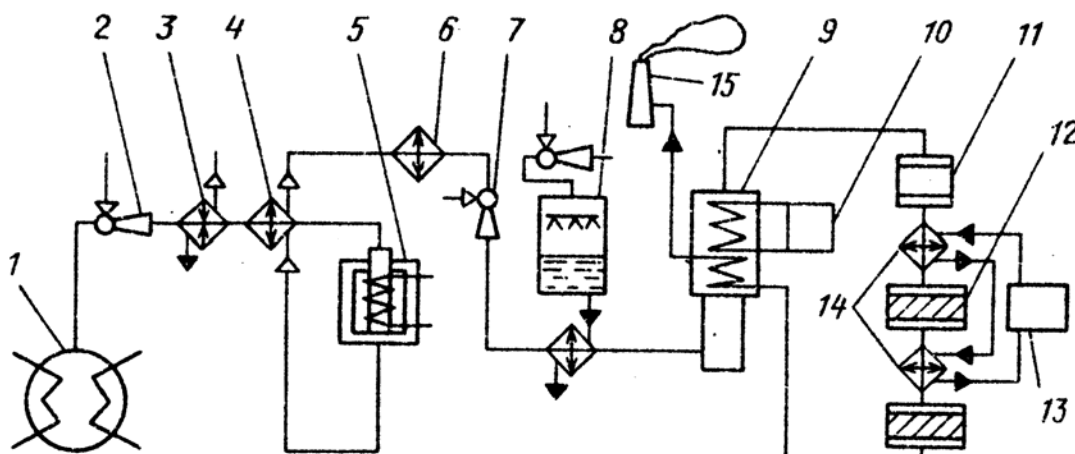
**Рециркуляционный режим.** Примером использования режима рециркуляции газа в замкнутой газовой системе, включающей угольный фильтр и очищаемую газовую полость, являются реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Защитный газ реактора на быстрых нейтронах заключен в сложные геометрические объемы, содержащие различные конструкционные элементы. При высокой удельной активности даже незначительные неорганизованные протечки

защитного газа могут привести к повышению газовой активности в смежных помещениях или в вентсистеме. Приходится непрерывно очищать газ.

Первоначально, после длительного останова системы или при ее пуске, осуществляется режим работы до проскока. Затем в газовую полость будет поступать газ с пониженной переменной концентрацией радионуклидов. За время удержания  $\tau$  происходит спад активности газа, а после проскока радионуклидов через уголь спустя время  $\tau$  -рост активности. Это приводит к

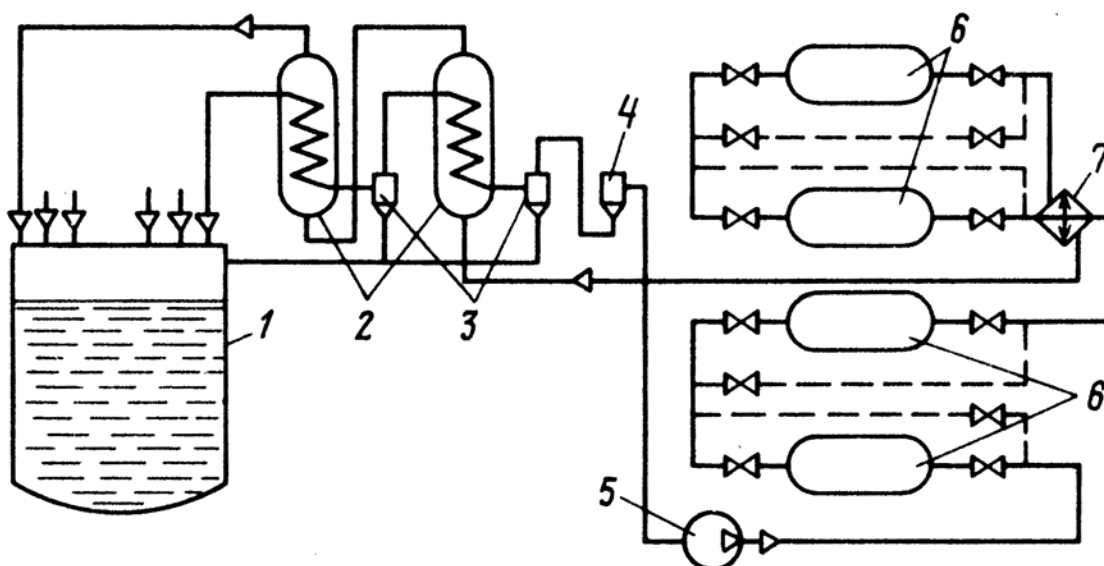


формированию второго фронта или пика активности в угольном адсорбере, просок которого наступает через время  $2\tau$  после включения установки.



**Рис.15** Принципиальная схема УПАК-II быстрого реактора ВК-50. 1 – конденсатор турбины; 2 – основной эжектор турбины; 3 – пусковой подогреватель; 4 – регенеративный подогреватель; 5 – контактный аппарат; 6 – конденсатор; 7 – одноступенчатый эжектор; 8 – парозежекторный холодильник; 9 – вымораживатель; 10, 13 – холодильная машина; 11 – головной адсорбер; 12 – основные адсорберы; 14 – доохладитель газа, 15 – вентиляционная труба

Угольная колонна в режиме рециркуляции практически не уменьшает активность относительно короткоживущих радионуклидов ( $^{85m}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{135m}\text{Xe}$ ) из-за натечки их в газовую полость из натрия. В таком случае снижение активности  $^{133}\text{Xe}$  имеет смысл проводить лишь до значения суммарной активности этих короткоживущих газообразных продуктов деления.



**Рис.16** Принципиальная схема угольной системы очистки для реактора на быстрых нейтронах

#### 4. ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ АЭС

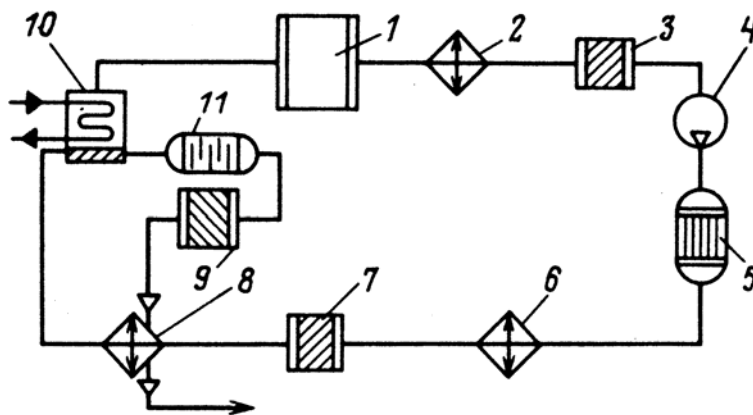
Создание безопасных и экономичных установок для обезвреживания радиоактивных технологических газов АЭС является задачей комплексной. Решать ее нужно не только за счет совершенствования таких установок, но и совершенствования и создания основного и вспомогательного оборудования АЭС, имеющих минимум технологических сдувок

радиоактивных газов. В качестве примера можно отметить, что в настоящее время расход эжекторных газов на турбинах отечественных АЭС в 5 раз больше, чем на зарубежных. Следует пересмотреть некоторые режимы газовых сдувок с целью снижения их объемных расходов.

В настоящее время при создании установок по подавлению активности (УПАК) для АЭС с РБМК принят вариант единой установки на два блока электрической мощностью 1000 МВт. Сложная система с большой тепловой инерционностью неспособна на быстрые изменения температурных режимов, связанных с изменением расходов разных источников технологических газовых сдувок. Такую систему трудно автоматизировать. Кроме того, при выходе из строя оборудования на самой УПАК сдувки технологических газов двух блоков реактора могут на какое-то время остаться без очистки. Практика показывает, что в таких случаях целесообразнее иметь небольшие системы очистки, расположенные на том оборудовании, где проводят сдувки радиоактивных газов. Поэтому такие устройства следует создавать на каждом реакторе, на каждой турбине.

Значительного снижения капитальных и эксплуатационных затрат при создании систем очистки, а главное увеличения надёжности таких установок, можно достичь, если для отдельных технологических операций использовать возможности основного и вспомогательного оборудования АЭС, подключением оборудования УПАК к регенеративной системе турбоустановки. Примером такого подхода может служить использование газового контура РБМК с организацией очистки сдуваемых газов непосредственно в самом контуре. В таком контуре имеются все элементы криогенной технологической схемы РГХС, кроме угольного адсорбера. В контуре используют оборудование для сжигания СО и Н<sub>2</sub>, осушки газов от паров воды и СО<sub>2</sub>, охлаждения газа до температуры 110К. Дефлегматор-разделитель азота от гелия работает в режиме дистилляционной колонны. В жидкий азот переходят все нуклиды Хе, Кг и <sup>41</sup>Аг. После выдержки в жидком виде в сосуде выдержки газовую смесь пропускают через угольный адсорбер

объёмом 0,5 м<sup>3</sup>, где происходит задержка криптона и ксенона, достаточная для снижения активности в 100 раз.



**Рис.17** Принципиальная схема газового контура РБМК: 1 – реактор, 2 – теплообменник; 3 – иодный фильтр; 4 – компрессор; 5 – контактный аппарат; 6 – конденсатор; 7 – цеолитовый адсорбер; 8 – газоохладитель; 9 – угольный адсорбер; 10 – дефлегматор; 11 – сосуд выдержки.

Принимаемые меры приводят к постепенному снижению выбросов радиоактивных газов в атмосферу.