

# **Лекция 13. ПРОДЛЕНИЕ РЕСУРСА И БЕЗОПАСНОСТЬ АЭС**

**Актуальные проблемы ЯЭ:**

**продление срока службы;**

**повышение безопасности, сейсмостойкости;**

**обеспечение замкнутого топливного цикла;**

**совершенствование методов и систем**

**диагностики; управления технологически ми**

**процессами и тяжелыми авариями.**

## **Повышение ресурсных характеристик и совершенствование эксплуатационных показателей**

### **ЯЭУ проводится по двум направлениям:**

- - **повышение назначенного ресурса оборудования и обеспечивающих систем ЯЭУ за счет совершенствования конструкции, отработки и других технических мероприятий на стадии проектирования;**
- - **внедрение систем мониторинга для оперативного эксплуатационного контроля расхода назначенного ресурса по всем видам оборудования, лимитирующим ресурс ЯЭУ в целом, с оценкой остаточного ресурса.**
- **Авария на АЭС Фукусима продемонстрировала необходимость ужесточение нормативных требований обеспечения сейсмостойкости АЭС.**

## *ПРОДОЛЖЕНИЕ*

# **Повышение ресурсных характеристик и совершенствование эксплуатационных показателей ЯЭУ**

- **При повышении ресурса работы оборудования, ВКУ и ТВС достигается не только снижение удельного расхода энергии на их изготовление и обслуживание, но и значительный экономический эффект.**
- **В числе главных являются задачи прогнозирования, выявления и предотвращения условий эксплуатации, приводящих к виброакустическим резонансам теплоносителя с вибрациями оборудования, способствующих ускоренной деградации конструкционных материалов, усталостным разрушениям элементов ВКУ и ТВС, и разгерметизации ТВЭЛ.**

**В настоящее время созданы методы и алгоритмы расчетов и обоснован выбор средств, предназначенных для прогнозирования и предотвращения условий возникновения роста вибраций ТВЭЛ, ТВС и ВКУ, обусловленных акустическими колебаниями теплоносителя.**

- Задачи выявления и предотвращения условий эксплуатации, приводящих к резонансному взаимодействию акустических колебаний теплоносителя с вибрациями оборудования и с сейсмическими нагрузками относятся к актуальным в настоящее время задачам.
- Результаты, касающиеся виброакустических резонансов в ядерных реакторах, получены в России путем проведения междисциплинарных исследований, т.е. на стыке нескольких наук.

**Разработанные российскими учеными методы и алгоритмы расчетов могут использоваться для количественных оценок СЧКДТ, добротности (Q), логарифмического коэффициента затухания колебаний давления в теплоносителе, вызванных внешними динамическими воздействиями на АЭС, в том числе и сейсмическими. Они могут использоваться для повышения сейсмостойкости существующих та и проектируемых ЯЭУ типа ВВЭР, а так же и для зарубежных станций типа BWR и PWR.**

- **Результаты расчетов показывают, в каком направлении и насколько следует изменить параметры теплоносителя для предотвращения резонансного взаимодействия СЧКДТ с вибрациями ТВС и ВКУ, т.е. для ограничения уровня вибраций.**

- **Предотвращение условий эксплуатации, приводящих к повышению вибраций из за возникновения виброакустических резонансов в первом контуре АЭС с ВВЭР-1000 должно быть обеспечено:**
- **ПУТЕМ ВНЕСЕНИЯ ДОПОЛНЕНИЙ В РЕГЛАМЕНТ ЭКСПЛУАТАЦИИ**
- **И МОЖЕТ БЫТЬ ОСУЩЕСТВЛЕНО СРЕДСТВАМИ ШТАТНЫХ СИСТЕМ АСУТП АЭС ВВЭР-1000.**

Анализ результатов измерения виброакустических сигналов на АС с ВВЭР-1000 позволил определить диапазон частот резонансного возбуждения синусоидальных сейсмических колебаний (от 0,5 до ~ 50 Гц).

- При попадании частоты сейсмических волн в полосы пропускания частот собственных колебаний **теплоносителя** в контуре АС и/или отдельных его элементов, или при совпадении их частот с частотами собственных колебаний теплоносителя происходит увеличение амплитуды сейсмической волны в контуре теплоносителя АС. Максимальной величины амплитуда сейсмической волны достигает при совпадении частот сейсмических волн с модами собственных колебаний теплоносителя. В этом случае произойдет кратное (соответственно величине  $Q$ ) увеличение амплитуды сейсмической волны в контуре теплоносителя АС и ее значений в процессе затухания волны.

## **источники пульсаций давления теплоносителя :**

- **главные циркуляционные насосы (ГЦН),** вращение которых приводит к появлению в спектре пульсаций давления частот комбинационных и кратных его оборотной частоте;
- **турбулентность потока и вихреобразования** в зонах изменения проходных сечений и направлений движения потока;
- **собственные колебаний давления теплоносителя,** который, как и любой конструктивный элемент, обладающий массой и упругостью, имеет набор собственных частот колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ). Эти колебания проявляются в виде акустических стоячих волн, фиксирующихся в различных точках проточной части первого контура.



- **вибрации, могут быть причиной повреждения трубных систем, внутрикорпусных устройств (ВКУ) оборудования и тепловыделяющих сборок (ТВС).**
- **Однако в настоящее время процессы взаимодействия между вибрациями оборудования и колебаниями теплоносителя на АЭС исследованы не достаточно.**

- По современным мировым оценкам ущерб от суточного простоя энергоблока с электрической мощностью 1000 МВт достигает нескольких сотен тысяч Евро.
- Увеличение кампании ядерного топлива в энергетических реакторах с 3-х до 10-ти и более лет является актуальной задачей.
- Характеристики топлива, удовлетворяющие этим показателем, определены и его изготовление не вызывает особых проблем.
- Иначе обстоит дело с обеспечением работоспособности оболочек ТВЭЛ.
- Опыт эксплуатации ТВЭЛ показывает, что главной причиной их повреждений является фреттинг - коррозия, т.е. износ из-за трения в зоне контакта поверхности ТВЭЛ с поверхностью прилегающего элемента дистанционирующей решетки.

**Интенсивность износа защитной оболочки ТВЭЛ при ФК возрастает при виброакустическом резонансе (ВАР), при котором частоты вибраций ТВЭЛ и/или ТВС попадают в полосу пропускания (ПП) акустических колебаний теплоносителя в активной зоне (АЗ) реактора**

- Частота акустических колебаний теплоносителя в АЗ зависит от величины скорости звука в теплоносителе и от геометрических размеров АЗ.
- Известно, что скорость звука в теплоносителе АЗ резко уменьшается при наличии в нем паровых и газовых пузырьков. Однако этот фактор в проектно-конструкторских материалах не рассматривается.
- Одной из главных задач является выявление и предотвращение возникновения условий эксплуатации, приводящих к виброакустическим резонансам колебаний ТВЭЛ, ТВС, ВКУ с колебаниями теплоносителя.

- Известно, что образование газовой фазы продуктов радиолиза воды обусловлено кипением теплоносителя. Поскольку кипение теплоносителя в активных зонах реакторов ВВЭР и РWR в условиях нормальной эксплуатации отсутствует, принято считать, что в пределах активной зоны теплоноситель однофазный.
- Однако, данные измерений акустических колебаний в первых контурах АЭС с ВВЭР – 1000, и результаты расчетов СЧКДТ, подтверждают правомерность физического обоснования механизма образования газовой фазы продуктов радиолиза в теплоносителе реакторов ВВЭР и РWR.
- Согласно этому механизму образование газовой фазы происходит в результате возникновения эффекта “пузырьковой камеры” в перегретой воде (или в паре), находящейся в узком зазоре, образованном наружной поверхностью тепловыделяющего элемента и прилегающей к ней поверхностью элемента дистанционирующей решетки.

- **Обоснование российскими учеными двухфазного состояния теплоносителя в активной зоне ВВЭР и РWR и зависимости СЧКДТ от уровня мощности реактора является чрезвычайно важным результатом, позволяющим прогнозировать возникновение виброакустических резонансов при проектировании и эксплуатации АЭС.**
- Особое значение разработка методов прогнозирования возникновения виброакустических резонансов и их предотвращения имеет для уменьшения разгерметизаций ТВЭЛ обусловленных фреттинг – коррозией.

- На рис.1 и 2 приведены примеры практического использования результатов расчета СЧКДТ, добротности, ПП для прогнозирования числа и места расположения в активной зоне ТВС, которые будут испытывать повышенные вибрации в исследованных режимах режимах.
- **ТВС с повышенным уровнем вибраций выделены темным цветом.**
- **Эти результаты получены путем использования программного комплекса, предназначенного для моделирования динамических процессов в реакторных установках с реакторами типа ВВЭР – 1000.**
-

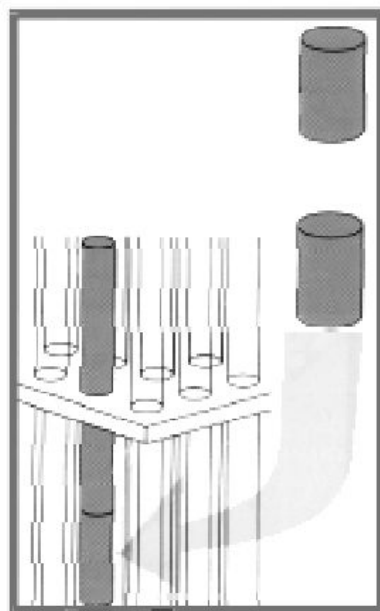






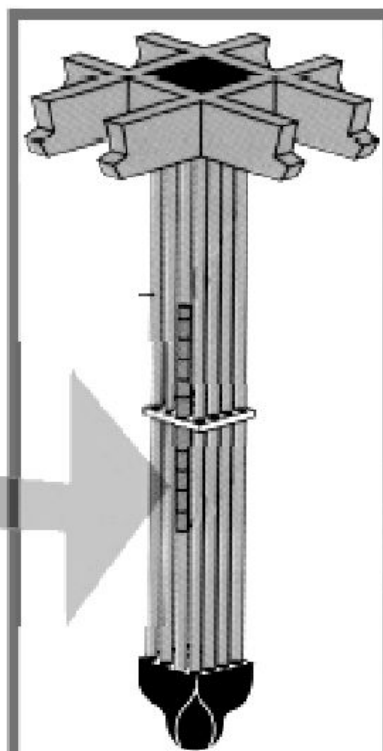


**1-й барьер**  
*топливная матрица*

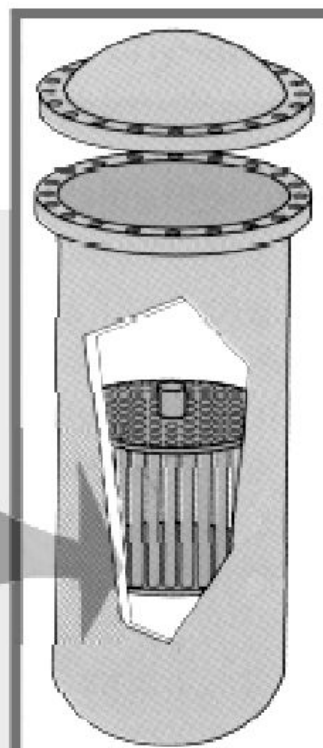


# БАРЬЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ

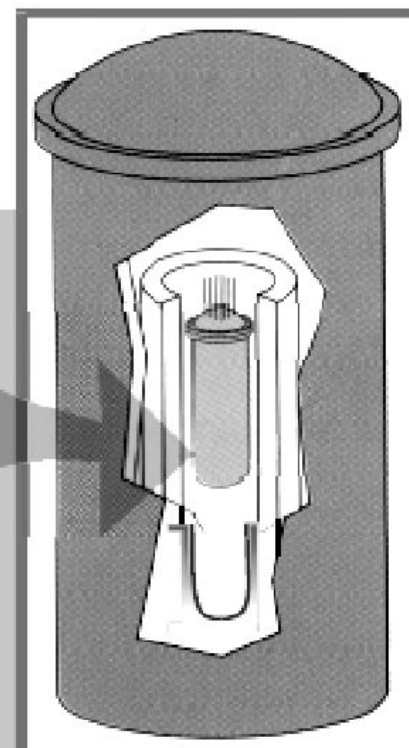
**2-й барьер**  
*оболочка твэла*



**3-й барьер**  
*корпус реактора*



**4-й барьер**  
*защитная оболочка*

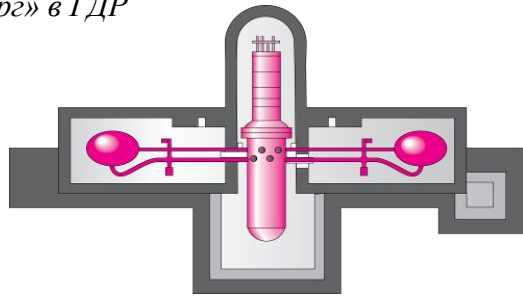


# Безопасность атомных станций с ВВЭР Проектно-технические решения

## Первые блоки АЭС с ВВЭР

*Малые течи теплоносителя. Герметичные помещения на избыточное давление 1 кг/см<sup>2</sup>.*

*Ново-Воронежская АЭС: 1 и 2 блоки.  
АЭС «Райнсберг» в ГДР*



## Первое поколение АЭС с ВВЭР-440

*Разрыв трубы до 100 мм.*

*Герметичные помещения на избыточное давление 1 кг/см<sup>2</sup>.*

*Ограниченный выброс избыточной среды при большом давлении.*

*Нововоронежская АЭС, 3-4 блоки*

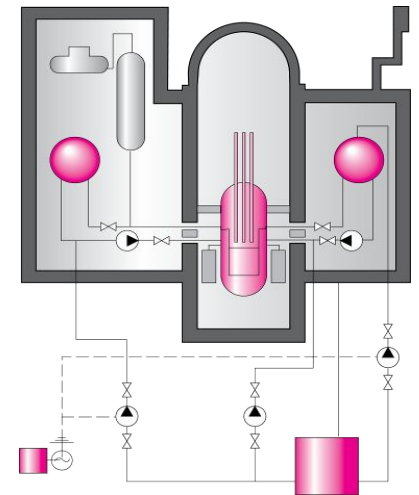
*Кольская АЭС, 1-2 блока*

*Армянская АЭС, 1-2 блока*

*АЭС «Норд» (ГДР), 1-4 блока*

*АЭС «Козлодуй» (Болгария), 1-4 блока*

*АЭС Богунце (Чехословакия), 1-2 блока*



## АЭС с ВВЭР-1000

*Защитная оболочка.*

*Разрыв трубы до 850 мм.*

*Нововоронежская АЭС, 5 блок*

*Южно-Украинская АЭС, 1-3 блока*

*Калининская АЭС, 1-3 блока*

*Запорожская АЭС, 1-6 блока*

*Балаковская АЭС, 1-4 блока*

*Ровенская АЭС, 3-4 блока*

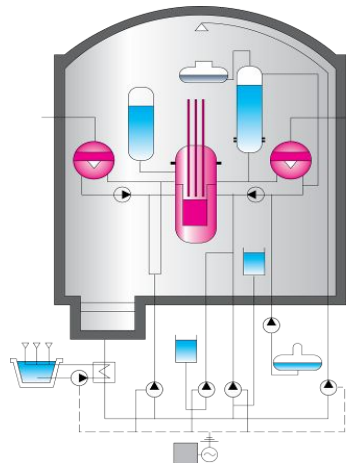
*Хмельницкая АЭС, 1-2 блока*

*Ростовская АЭС, 1 блок*

*АЭС «Козлодуй» Болгария, 5-6 блока*

*АЭС «Темелин», Чехия, 1-2 блока*

*АЭС «Тянь-Вань», Китай, 1-2 блока*



## АЭС-2006

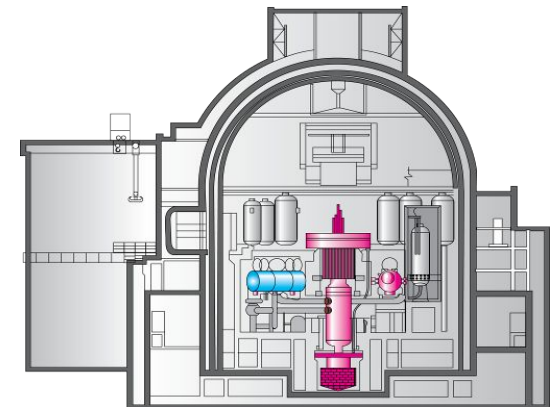
*Двойная защитная оболочка.*

*Пассивный теплоотвод.*

*Удержание расплавленной активной зоны.*

*Ведется строительство*

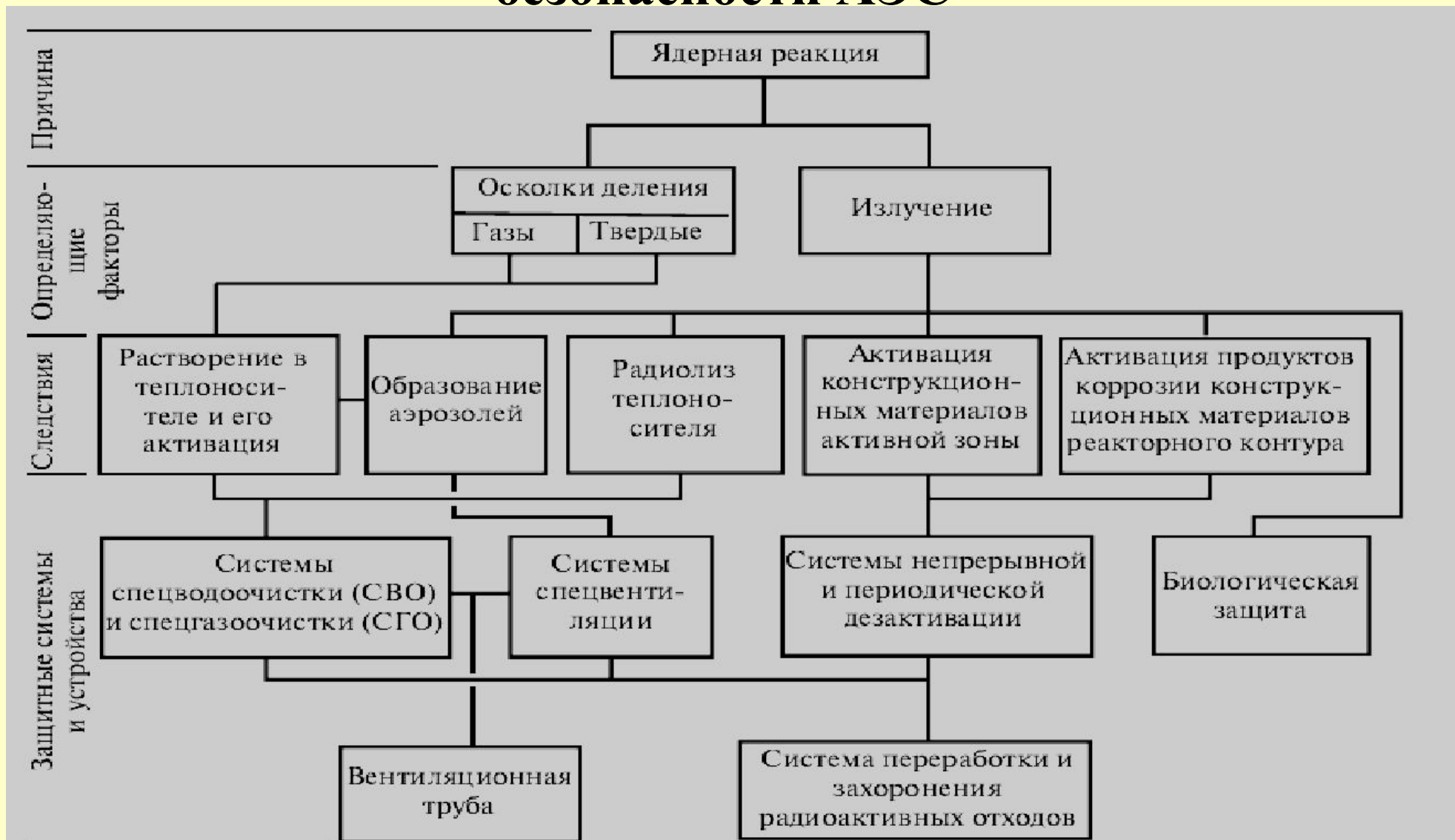
*ЛАЭС-2 и НВАЭС-2*



# Лекция 14. Радиационная безопасность в условиях нормальной эксплуатации АЭС

- Материальными носителями радиационной активности на АЭС являются осколки деления ядерного горючего и излучение, возникающее при его делении. Они же являются факторами, определяющими радиационную активность и необходимый комплект оборудования АЭС по номенклатуре и мощности для ее локализации и минимизации. От них зависят также возможности распространения радиационного воздействия в пределах АЭС и пути распространения радиоактивности по технологическому оборудованию АЭС.
- Твердые радионуклиды, как правило, не выходят за пределы оболочки твэлов и соответственно в этих же пределах локализуется радиационная опасность, связанная с ними. Твердые радионуклиды топливного происхождения могут выходить за пределы твэлов лишь вследствие непосредственного контакта топлива с теплоносителем в результате разгерметизации оболочек твэлов.

# Структурная схема обеспечения радиационной безопасности АЭС



- Осколки деления ядер топлива являются фактором, определяющим радиационную обстановку на АЭС
- Газообразные осколки деления могут выделяться из теплоносителя при изменении его теплофизического состояния. Вследствие этого они могут скапливаться в верхних частях оборудования АЭС (в компенсаторе объема и барбатере, коллекторах парогенератора, ГНЦ и т.п.), откуда удаляются в систему спецгазоочистки (СГО).
- Особенно интенсивное выделение газообразных осколков деления происходит при снижении параметров 1-го контура, организованном выводе части теплоносителя из циркуляционного контура, например, при сбросе теплоносителя в баки грязного конденсата и т.п.
- Для вывода газообразной топливной активности из этих емкостей осуществляется вентиляция их газовых объемов азотом с последующей подачей парогазовых смесей в систему СГО.

# Система дожигания водорода

- Кислород, образующийся из воды при ее радиоллизе, расходуется на коррозию конструкционных материалов реакторной и вне реакторной частей 1-го контура.
- Коррозия в условиях циркуляционного контура АЭС с ВВЭР протекает по электрохимическому типу с водородной деполяризацией, что дает дополнительный источник генерации водорода в контуре.
- Коррозионный водород, выделяющийся из теплоносителя, вместе с радиолитическим водородом и другими газами поступает в систему СГО.
- **Наличие водорода создает опасность взрыва в системе СГО (нижний предел взрывоопасной концентрации водорода в воздухе 0,041 или 4,1 % его объемной доли).**
- **Газовые смеси освобождают от водорода методом сжигания, т.е. инициируя контролируемую химическую реакцию его соединения с кислородом при контакте с катализатором. Продуктом этой реакции является вода.**



## Образование радиоактивных отложений на оборудовании

- Водный теплоноситель содержит примеси, которые могут состоять из двух групп: естественных примесей и продуктов коррозии.
- Примеси природной воды (естественные примеси), которые могут в определенных количествах оставаться в теплоносителе после его обработки в системах водоподготовки, не представляют опасности с точки зрения образования радиоактивных отложений, так как их концентрации остаются постоянными, поскольку внутренние источники обогащения теплоносителя этими примесями в циркуляционном контуре АЭС отсутствуют. В связи с этим их концентрации остаются в пределах растворимости.
- Кроме того, эти примеси дают в результате ядерных реакций радионуклиды, обладающие  $\beta$ -излучением, которое имеет малую проникающую способность, и оно практически целиком поглощается стенками трубопроводов или других металлоконструкций.

- Продукты коррозии представляют собой оксидные и гидроксидные формы элементов, входящих в состав конструкционных материалов реакторного контура.
- Продукты коррозии образуются на поверхности металлов и сплавов, контактирующих с теплоносителем, а затем переходят в него в качестве примеси в результате диффузии или гидродинамического воздействия потока теплоносителя.
- Так как эти примеси поступают из внутреннего источника (конструкционные материалы циркуляционного контура), этот процесс продолжается в течение всего периода эксплуатации АЭС.
- Скорость коррозии конструкционных материалов реакторного контура АЭС с течением времени падает, но на определенном уровне остается длительное время, и в соответствии с выходом продуктов коррозии продолжается их поступление в теплоноситель.
- Вместе с циркулирующим теплоносителем примеси продуктов коррозии проходят через активную зону, где участвуют в ядерных реакциях с нейтронами излучения.



**Радиоактивные отложения образуются на всех поверхностях реакторного контура, контактирующих с теплоносителем. Транспорт продуктов коррозии и радионуклидов продуктов коррозии по реакторному контуру осуществляется теплоносителем.**

Радиоактивные отложения, находящиеся непосредственно в пределах реактора, составляют малую долю мощности дозы излучения реактора и не оказывают заметного влияния на работу АЭС. Основное внимание поэтому уделяется образованию радиоактивных отложений во вне реакторной части циркуляционного контура (парогенераторы, ГЦН, трубопроводы и арматура).

- Можно назвать три основных механизма, ответственных за накопление радионуклидов на оборудовании АЭС, расположенном во вне реакторной части контура циркуляции теплоносителя.

- *Коррозия конструкционных материалов активной зоны и реактора в целом.*
- *Коррозия конструкционных материалов внереакторной части контура.*
- *Отложения продуктов коррозии внереакторной части контура в реакторе на теплопередающих поверхностях (оболочках твэ-лов) и на поверхностях без теплообмена (внутриреакторных устройствах, корпусе и т.п.).*
- Слой отложений представляет собой динамичную структуру, в которой непрерывно протекают процессы осаждения и смыва.
- На АЭС с ВВЭР-1000 этим трем механизмам образования радиоактивных отложений противостоит лишь один фактор — непрерывный отвод части теплоносителя из контура циркуляции на очистную установку (СВО-1 или СВО-2). В связи с этим байпасную очистку теплоносителя, обеспечивающую поддержание концентрации продуктов коррозии в теплоносителе в допустимых пределах, следует рассматривать как установку непрерывной дезактивации первого контура.

## Методы и средства дезактивации оборудования

- Для реакторного контура в целом используют, как правило, химические методы дезактивации.
- Методы периодической химической дезактивации разрабатываются применительно к конкретным условиям данной АЭС с учетом количества, структуры, химического и изотопного состава отложений и целей дезактивации.
- Если дезактивация должна быть полной, то при разработке методов следует исходить из необходимости полного растворения всего оксидного слоя, включая и труднорастворимые соединения.
- При выборе метода дезактивации конкурирующие методы оценивают по следующим критериям: длительности процесса; коэффициенту дезактивации; степени коррозионного воздействия на основные конструкционные материалы; количеству сбросных радиоактивных вод; возможности концентрации радиоактивности, например, на ионообменных фильтрах; технологическим условиям проведения процесса дезактивации по температуре, времени, скорости движения раствора; возможности использования основного оборудования контура; дефицитности реагентов, их стоимости, условиям хранения, обращения и т.д.

- Химический метод дезактивации используют применительно к оборудованию установок спецводоочистки, циркуляционных петель реактора и контура в целом, насосам, арматуре, приводам СУЗ, чехлам хранения кассет и инструменту.
- Иногда для удовлетворения эксплуатационных потребностей может оказаться достаточной дезактивация части реакторного контура. Этой цели служат специальные дезактивационные установки, например установка для дезактивации парогенераторов, созданная в России и используемая на практике, в том числе и за рубежом. Оптимизация режимов и средств дезактивации должна осуществляться с учетом не только количества накопившейся радиоактивности на оборудовании, но и темпа ее нарастания.

- Максимальный уровень роста радиоактивности до проведения дезактивации определяется рядом технико-экономических соображений.
- Основа комплекса экономических соображений — эквивалентность затрат на дезактивацию и экономия на трудозатратах (с учетом дозовой нагрузки) для проведения осмотра, ревизии или ремонта оборудования после дезактивации.
- Естественно, стоимость дезактивации должна быть меньше или, по крайней мере, равна достигаемой экономии., главными затратами при дезактивации являются недовыработка электроэнергии и стоимость переработки отходов, в связи с чем стоимость дезактивации существенно возрастает при увеличении продолжительности дезактивации и количества радиоактивных сбросов.

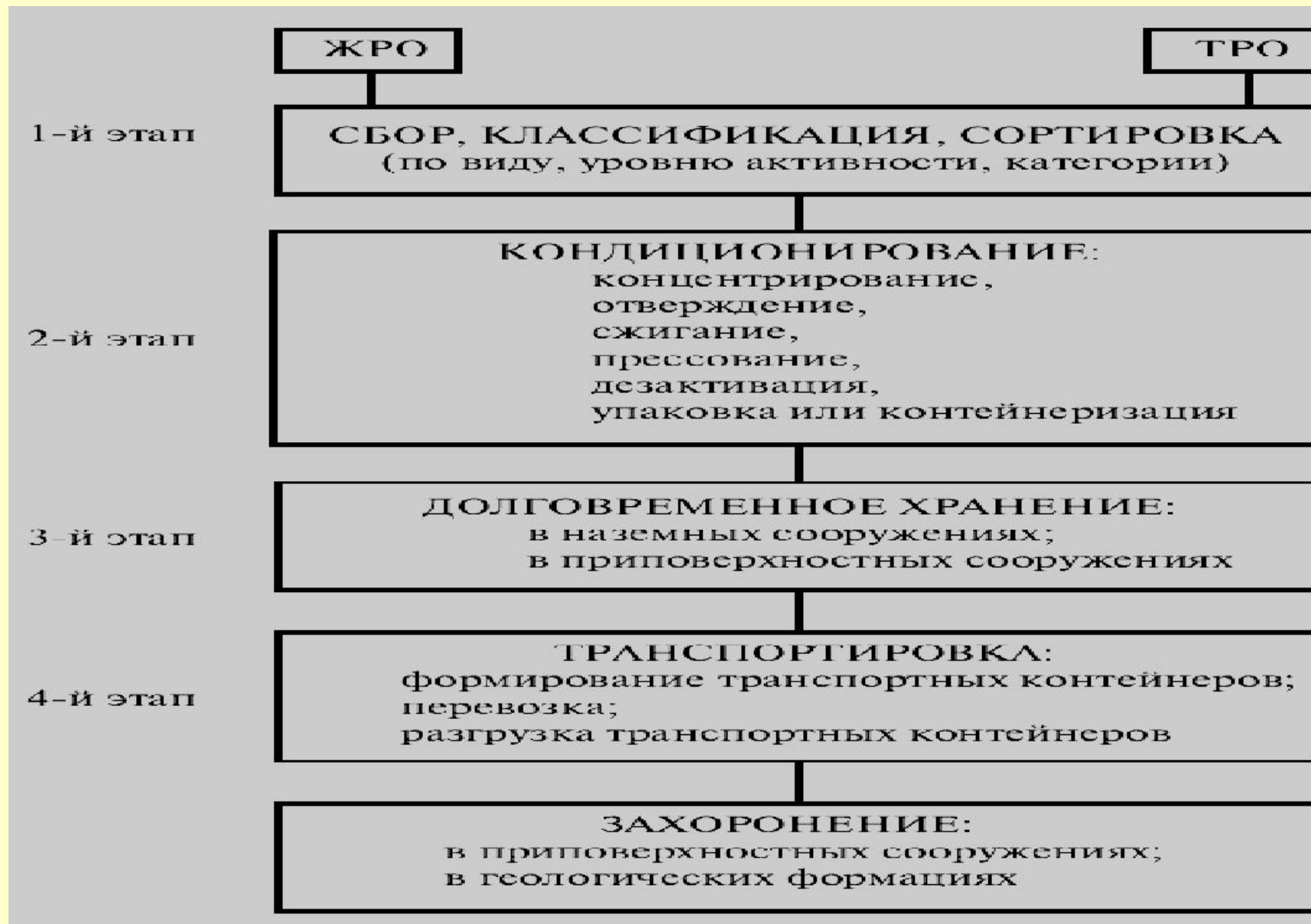
# Обращение с радиоактивными отходами на атомной электростанции

- **Классификация радиоактивных отходов**
- К радиоактивным отходам (РАО) относятся не подлежащие дальнейшему использованию растворы, газы, изделия, материалы, оборудование, аппаратура, грунт, содержащие радиоактивные вещества в количествах, превышающих безопасные для экосферы значения, установленные действующими нормативами.
- *Радиоактивные отходы классифицируются по агрегатному состоянию, уровню активности и физико-химическому состоянию .*
- По агрегатному состоянию РАО подразделяются на жидкие, твердые и газообразные.
- По уровню активности жидкие отходы (ЖРО) подразделяются на высокоактивные, среднеактивные и низкоактивные ; твердые (ТРО) — на отходы 1-й группы (слабоактивные), 2-й группы (среднеактивные) и 3-й группы (высокоактивные);

**В настоящее время единственным приемлемым способом относительного обезвреживания отходов является хранение в течение длительного времени с целью распада содержащихся в них радионуклидов.**

- до 300 лет — для отходов низкого и среднего уровней активности, содержащих продукты активации и малые количества долгоживущих продуктов деления;
- до 1000 лет — для высокоактивных отходов, содержащих долго-живущие продукты деления;
- более 1000 лет — для отходов, содержащих трансурановые элементы .
- Радиоактивные отходы, образующиеся на АЭС в период эксплуатации относятся в основном к низкоактивным отходам и содержат радионуклиды с периодом полураспада менее 30 лет. Количество высокоактивных отходов составляет менее 1 % общего количества РАО.

# Схема обращения с РАО





## ***Общие требования к хранилищам:***

- обеспечение максимально возможной степени **безопасности персонала АЭС, населения и окружающей среды;**
- обеспечение **надежности хранения РАО** на весь период хранения; поддержание заданного режима хранения;
- обеспечение **возможности извлечения** отходов для дополнительной обработки и/или захоронения;
- обеспечение надежного **контроля за безопасностью хранения.**
- *Требования к хранилищам жидких радиоактивных отходов* предусматривают хранение данного вида отходов в специальных емкостях, конструкция которых **исключает возможность утечек радиоактивных растворов в грунт и подземные воды.**
- Емкости должны быть обеспечены системами перемешивания содержимого, теплоотвода, выдачи растворов в необходимом режиме, **контроля уровня, температуры, давления и радиационного контроля.** Обязательно наличие системы разбавления радиолитического водорода.
- *Требования к хранилищам твердых радиоактивных отходов* предусматривают хранение твердых и отвержденных РАО в специальных отсеках с учетом характеристик отходов и упаковок.

# Практика обращения с радиоактивными отходами на АЭС с реактором ВВЭР

- Отработавшие тепловыделяющие сборки временно хранят в бассейне выдержки энергоблока, а в дальнейшем (вплоть до момента вывоза на радиохимический комбинат) — в хранилище отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ).
- **Обращение с твердыми радиоактивными отходами.** При сортировке ТРО 1-й группы подразделяются на сжигаемые, прессуемые и не перерабатываемые. Сортировка проводится по месту сбора ТРО путем загрузки в соответствующие контейнеры. При этом, крупногабаритное оборудование подвергается разборке и фрагментации до требуемых габаритов. Дезактивированные металлические отходы направляются на переплавку.
- Для обеспечения безопасного обращения с ТРО используют специальные контейнеры, конструкция которых предусматривает возможность механизированной погрузки и разгрузки. Биологическая защита контейнеров должна обеспечивать мощность дозы на расстоянии 1 м от сборника с РАО на более 10 мбэр/ч.

## Обращение с жидкими радиоактивными отходами ●

- При эксплуатации энергоблока с реактором ВВЭР для переработки ЖРО предусмотрены установки специальной водоочистки. Имеется семь видов специальных водоочисток. Часть систем СВО относится к установкам спецводоочисток реакторного отделения (это СВО-1 и СВО-2), а часть (СВО-3, СВО-4, СВО-5, СВО-6 и СВО-7) — к установкам спецводоочисток спецкорпуса.
- *Система СВО-1* предназначена для очистки теплоносителя 1-го контура от дисперсных продуктов коррозии конструкционных материалов и является системой нормальной эксплуатации.
- *Система СВО-2* предназначена для очистки теплоносителя в ходе всех операций, связанных с изменением концентрации борной кислоты в 1-м контуре, для снижения активности или концентрации хлоридов в теплоносителе, при разогреве 1-го контура во время пуска, а также для очистки организованных протечек контура в период нормальной эксплуатации.

- Система СВО-2 размещается в реакторном отделении. Установка СВО-2 имеет системы технологического контроля, радиационного контроля, автоматического регулирования, дистанционного управления и технологической сигнализации.
- Система СВО-3 предназначена для очистки трапных вод: неорганизованных протечек объектов реакторного отделения и технического водоснабжения, вод дезактивации, регенерационных вод (после регенерации и взрыхления ионообменных фильтров всех спецводоочисток), возвратных вод узла хранения ЖРО, вод с повышенным уровнем активности из контрольных баков установок СВО-4, СВО-5, СВО-6, СВО-7.

# Лекция 15. Контроль и диагностика реакторов ВВЭР большой мощности

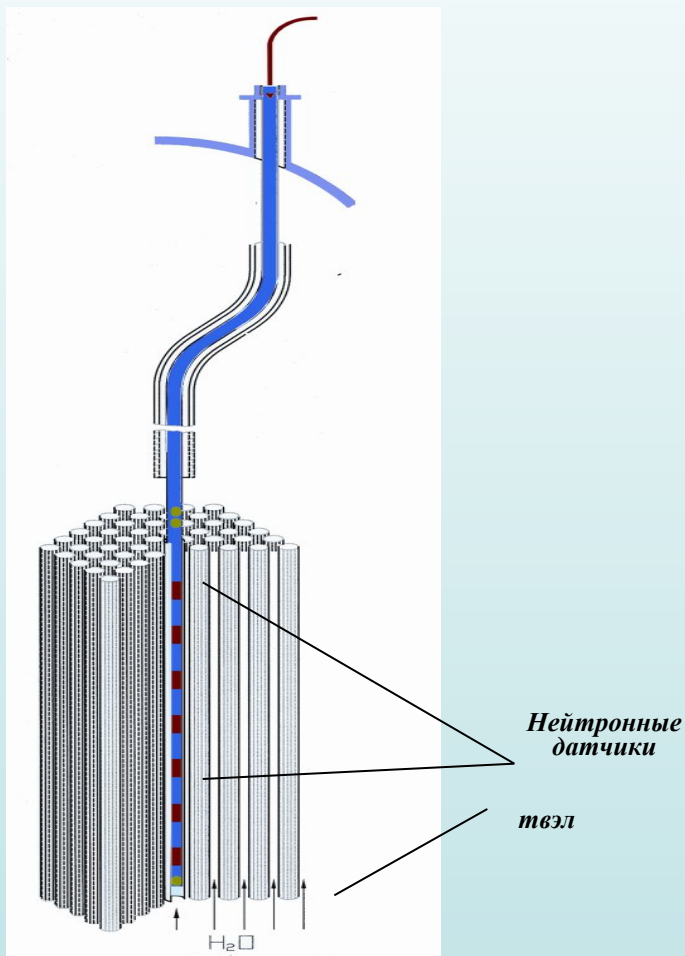
- Система контроля, управления и диагностики (СКУД) обеспечивает комплексный контроль и диагностирование реактора ВВЭР.
- СВРК + СКВ + СКТ + СОСП + СКД + САКОР + СКА = СКУД
- СВРК + СКВ + СКТ + СОСП + СКД + САКОР + СКА = СКУД
- Разработчик СКУД – РНЦ «Курчатовский институт» при участии ОКБ «Гидропресс», ВНИИАЭС, ГНЦ РФ – ФЭИ, Диапром, СНИИП-АСКУР, СНИИП.

## диагностики ВВЭР:

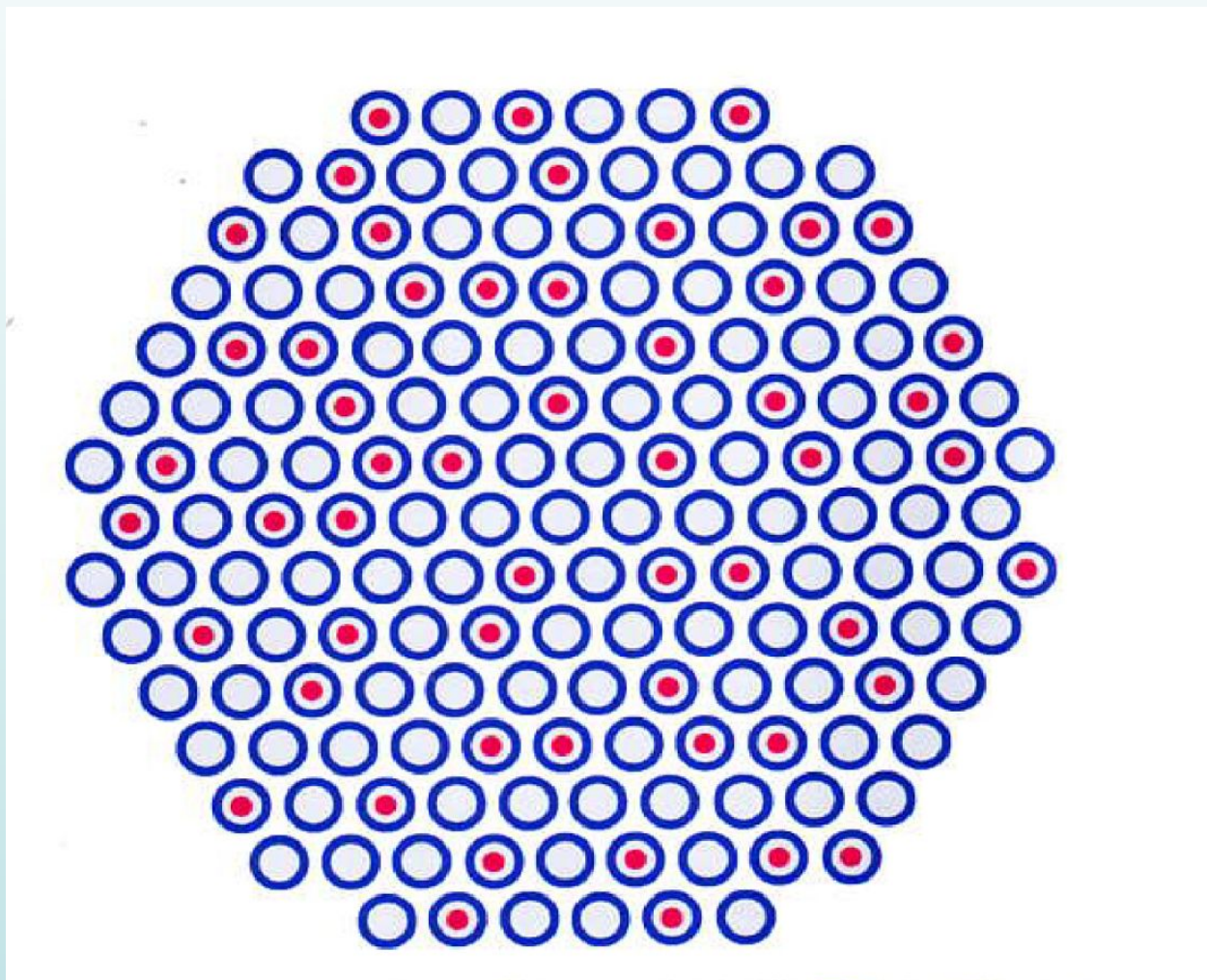
- система внутриреакторного контроля (СВРК);
- система управления и защиты (СУЗ), включая систему внереакторного контроля нейтронного потока (СКНП);
- управляющая система безопасности по технологическим параметрам (УСБТ);
- система верхнего блочного уровня (СВБУ);
- система виброшумовой диагностики (СКВ);
- система контроля течей теплоносителя (СКТ);
- система обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов (СОСП);
- система комплексного диагностирования (СКД);
- система технического диагностирования ГЦНА (СТД ГЦНА);
- система контроля остаточного циклического ресурса оборудования (САКОР);
- система комплексного анализа (СКА);
- система диагностики арматуры.



# Размещение внутриреакторных датчиков в активной зоне

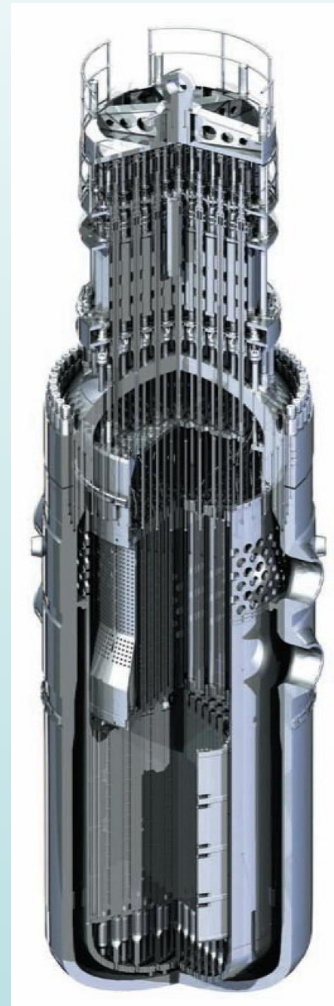


*Внутриреакторный измерительный канал (КНИ), размещенный в ТВС*



СВРК является основным средством наблюдения за эксплуатацией топлива в активной зоне в режимах нормальной эксплуатации, нарушения нормальной эксплуатации реакторов ВВЭР и проектных авариях

Проектные  
расчеты



СВРК



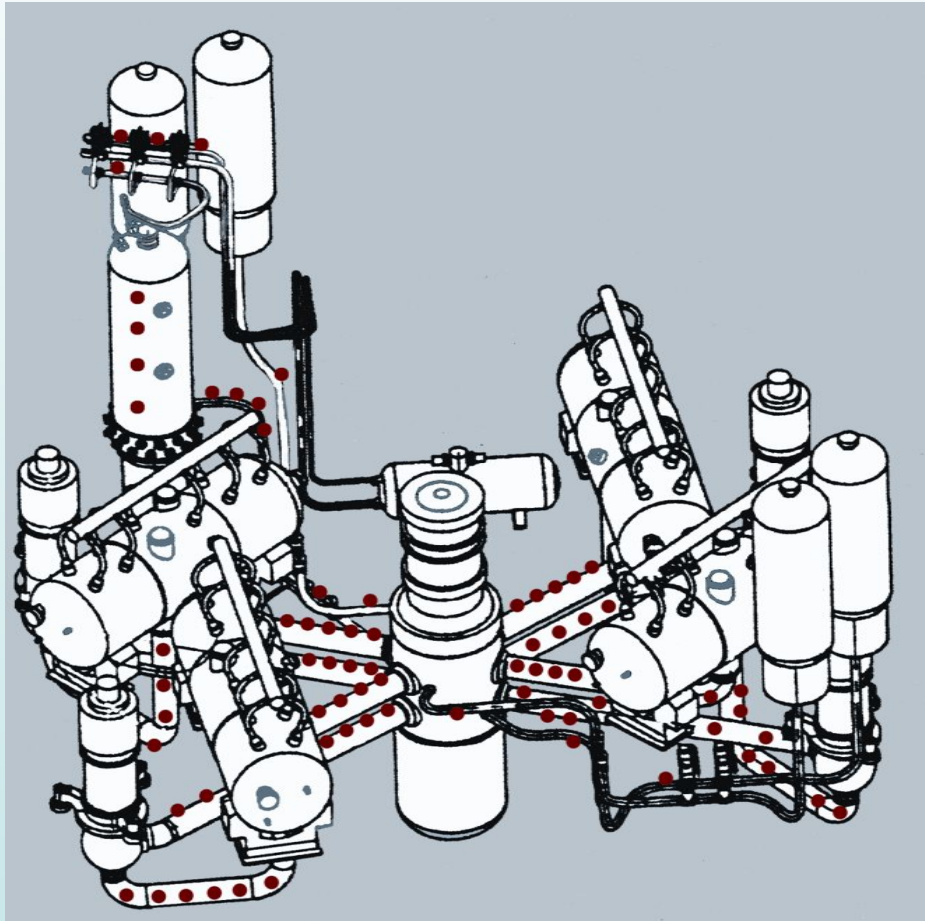
**СВРК-М – новое поколение систем внутриреакторного контроля на ВВЭР-1000.**

**Основу СВРК –М проекта РУ В-320 составляют:**

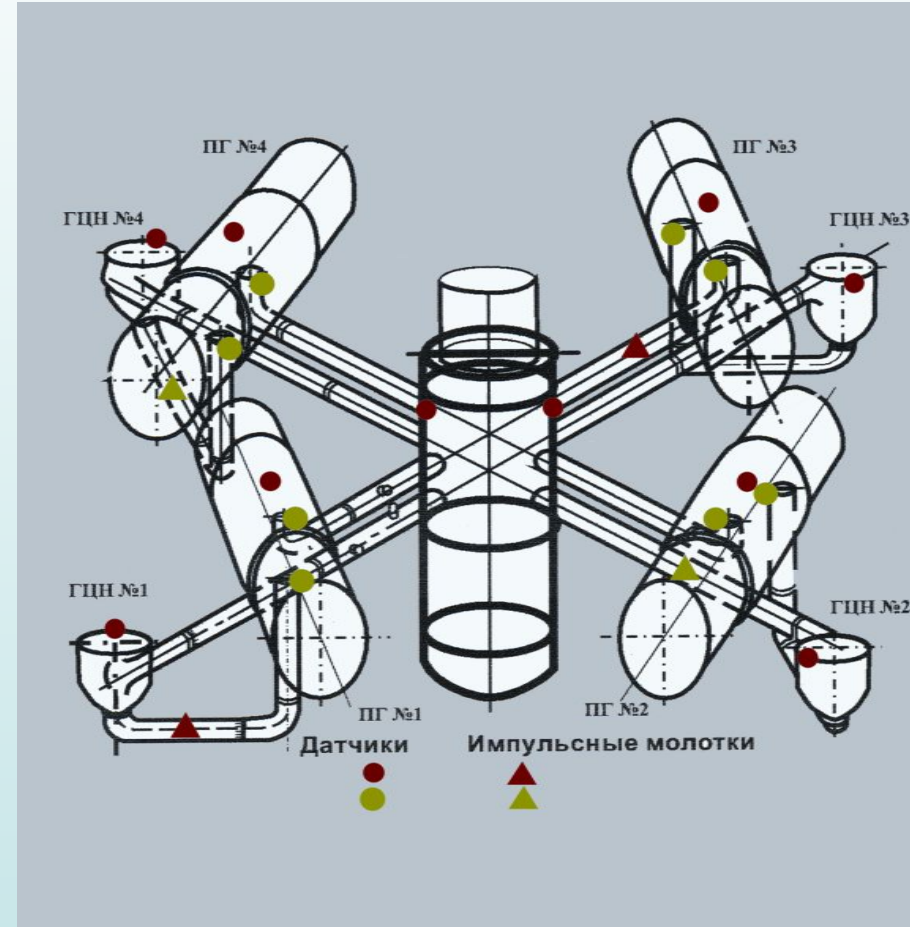
- **внутриреакторные датчики нейтронного потока**
- **измерительная аппаратура высокого класса точности (погрешность 0,05% для всех измерительных каналов)**
- **высокопроизводительная вычислительная техника в исполнении для ответственных применений;**
- **специализированное программное обеспечение.**

**Всё оборудование и специализированное программное обеспечение СВРК-М разработано и изготовлено в России.**

# Размещение датчиков систем диагностики СКУД (СКТ и СОСП) на оборудовании ВВЭР-1000



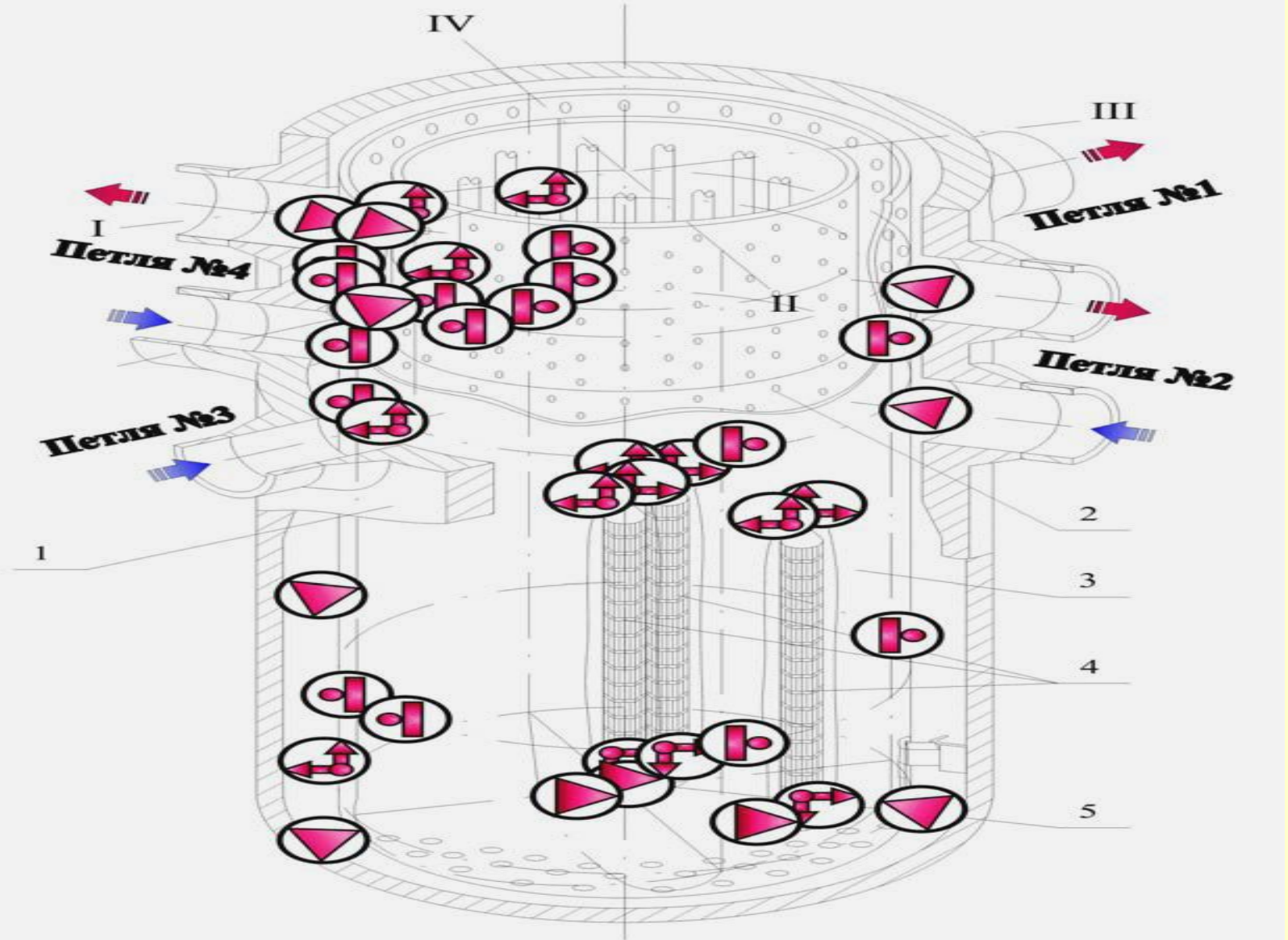
*Размещение датчиков контроля  
течи теплоносителя*



*Размещение датчиков обнаружения  
свободных предметов в  
контуре циркуляции теплоносителя*

а – схема комплексного механизма гидродинамического возбуждения  
вибраций в конструкции;

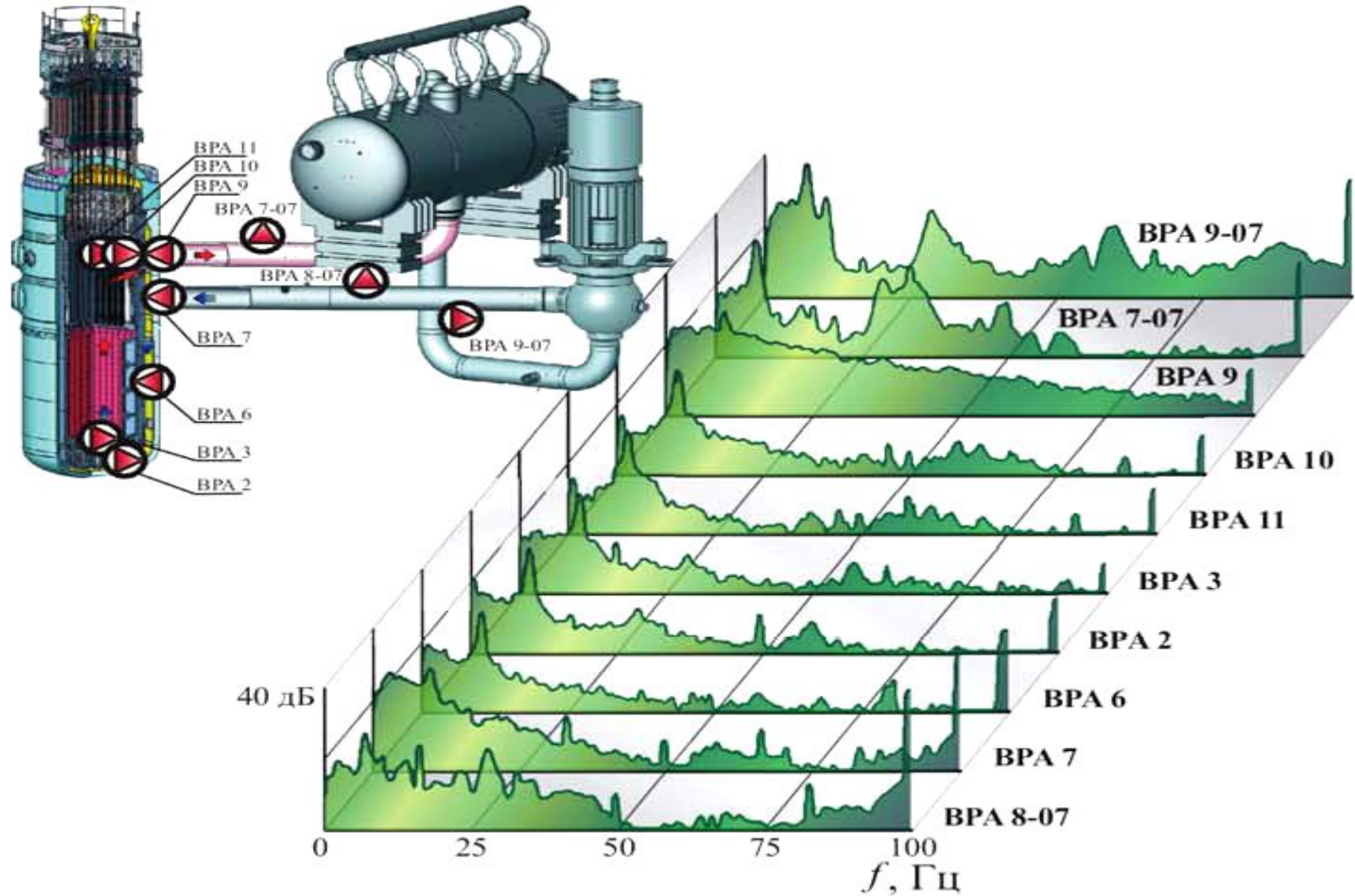
Состав измерительных средств при проведении пусконаладочных вибродинамических внутриреакторных измерений



- преобразователь пульсаций давления (BPA) - 11 шт.
- преобразователь динамических деформаций (UTD) - 42 шт.
- преобразователь виброизмерительный (WVC) - 10 шт.

- 1 - корпус реактора;
- 2 - обечайка БЗТ (2 BPA, 3 WVC, 5 UTD);
- 3 - шахта внутрикорпусная (6 BPA, 2 WVC, 16 UTD);
- 4 - вибродиагностический имитатор ТВС (3 шт.);
- 5 - опорная труба (3 BPA)





*Распределение АСПМ пульсаций давления по контуру РУ серии В-320 при работе четырех ГЦН на номинальных параметрах*



- **Предложены конфигурация и программно-методическое обеспечение системы пусконаладочного виброконтроля внутриреакторного оборудования для применения на вводимых серийных энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000**
- **Разработаны критерии приемлемости гидродинамической неустойчивости потока теплоносителя в первом контуре, динамического отклика и вибронегруженности элементов оборудования РУ.**

- Данные динамических испытаний и измерений в период ПНР на вновь пускаемых блоках РУ серии В-320 (планируемых к вводу в эксплуатацию в ближайшие годы) также подлежат включению в базу вибросостояний ВКУ и ТВС ВВЭР-1000 для обобщения с целью уточнения и оптимизации критериев приемлемости результатов пусконаладочных динамических испытаний.
- Для РУ АЭС повышенной безопасности, имеющих конструктивные отличия по сравнению с прототипной РУ В-320 вышеуказанные критерии принимаются за базовые, но уточняются на основании расчетно-экспериментальных оценок, проведенных с учетом отличительных особенностей конкретной РУ.



- предварительные прогнозы указывают на близкий характер распределения интенсивностей пульсаций давления по гидравлическому тракту для новых и серийных РУ с ВВЭР-1000. значения собственных частот колебаний ВКУ реактора РУ В-428 могут отличаться от идентичных характеристик вибрации ВКУ серийного реактора не более чем на 4-6%. Таким образом, критерии приемлемости результатов пуска и наладочных динамических испытаний основного оборудования РУ В-320 могут быть приняты в качестве базовых для новых проектных решений РУ АЭС с ВВЭР-1000.
- Уточнение критериев выполняется по результатам СПНИ блоков 1, 2 АЭС «Тяньвань». Критерии пусконаладочного контроля нагруженности внутрореакторного оборудования ВВЭР-1000 и другие результаты, полученные в рамках настоящих исследований, являются основой для дальнейшего повышения эффективности вибродинамического комплекса СПНИ с постепенным расширенным включением в него средств эксплуатационного контроля.

- **Ближайшими и перспективными задачами *современного этапа* (в т.ч. и для новых проектов ВВЭР, включая и АЭС-2006) являются следующие:**
- – разработка и внедрение методов и средств виброакустического контроля эксплуатации канала регулирования реактивности ВВЭР-1000, включая привода СУЗ
- – наработка программно-методического обеспечения внешнего виброконтроля на основе экспериментально-расчетного моделирования различных событий и вибросостояний внутриреакторного оборудования;
- – развитие базы данных и методологии для комплексного совершенствования СПНИ с целью подкрепления СКУД и САКОР на основе методов и средств вибродинамического, тепло- гидравлического и термомеханического предэксплуатационного контроля.

Табл. 4. Возможные неисправности в условиях закрепления внутриреакторного оборудования

	Элемент реактора	Обозначенные зоны	Описание неисправности
	Внутрикорпусная шахта	1 2 3 4 5	1 Релаксация прижимных труб 63x5 мм с ослаблением прижатия шахты со стороны крышки реактора 2 Превышение проектных зазоров по разделительному кольцу 3 Задиры или износ контактных поверхностей шпонок и шпоночных пазов 4 Попадание посторонних предметов под упоры днища шахты
	Блок защитных труб	6 7	6 Превышение проектных зазоров в шпоночных соединениях нижней плиты БЗТ с шахтой 7 Повреждение сварных соединений крепежей направляющих труб КНИ
	Тепловыделяющая сборка	8 9	8 Релаксация пружинных блоков в головках ТВС 9 Формоизменение ТВС с изменением межкассетных зазоров
	Опорные трубы днища шахты	10	Нарушение целостности швов приварки опоры, износ посадочных поверхностей

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

- **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ  
В ПЕРВОМ КОНТУРЕ АЭС С ВВЭР-1000.**

- При разработке АЭС нового поколения ставятся задачи обеспечения сроков их службы более 60-ти лет и работы в маневренных режимах с повышенной и частичной мощностью. Для достижения этих целей необходимо совершенствование оборудования и режимов работы АЭС на стадии их проектирования, изготовления и эксплуатации.
- Одним из главных направлений является разработки методов, технических средств и программного обеспечения для раннего выявления и предотвращение условий эксплуатации, приводящих к резонансному или близкому к резонансному взаимодействию колебаний и вибраций ВКУ ТВЭЛ, ТВС, ВКУ с пульсациями и акустическими колебаниями теплоносителя.

## **источниками пульсаций давления теплоносителя являются:**

- **главные циркуляционные насосы (ГЦН)**, вращение которых приводит к появлению в спектре пульсаций давления частот комбинационных и кратных его оборотной частоте;
- **турбулентность потока и вихреобразования** в зонах изменения проходных сечений и направлений движения потока;
- **собственные колебаний давления теплоносителя**, который, как и любой конструктивный элемент, обладающий массой и упругостью, имеет набор собственных частот колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ). Эти колебания проявляются в виде акустических стоячих волн, фиксирующихся в различных точках проточной части первого контура.

- **вибрации, могут быть причиной повреждения трубных систем, внутрикорпусных устройств (ВКУ) оборудования и тепловыделяющих сборок (ТВС).**
- **Однако в настоящее время процессы взаимодействия между вибрациями оборудования и колебаниями теплоносителя на АЭС исследованы не достаточно.**

## **обнаружены режимы, в которых происходит аномальный рост**

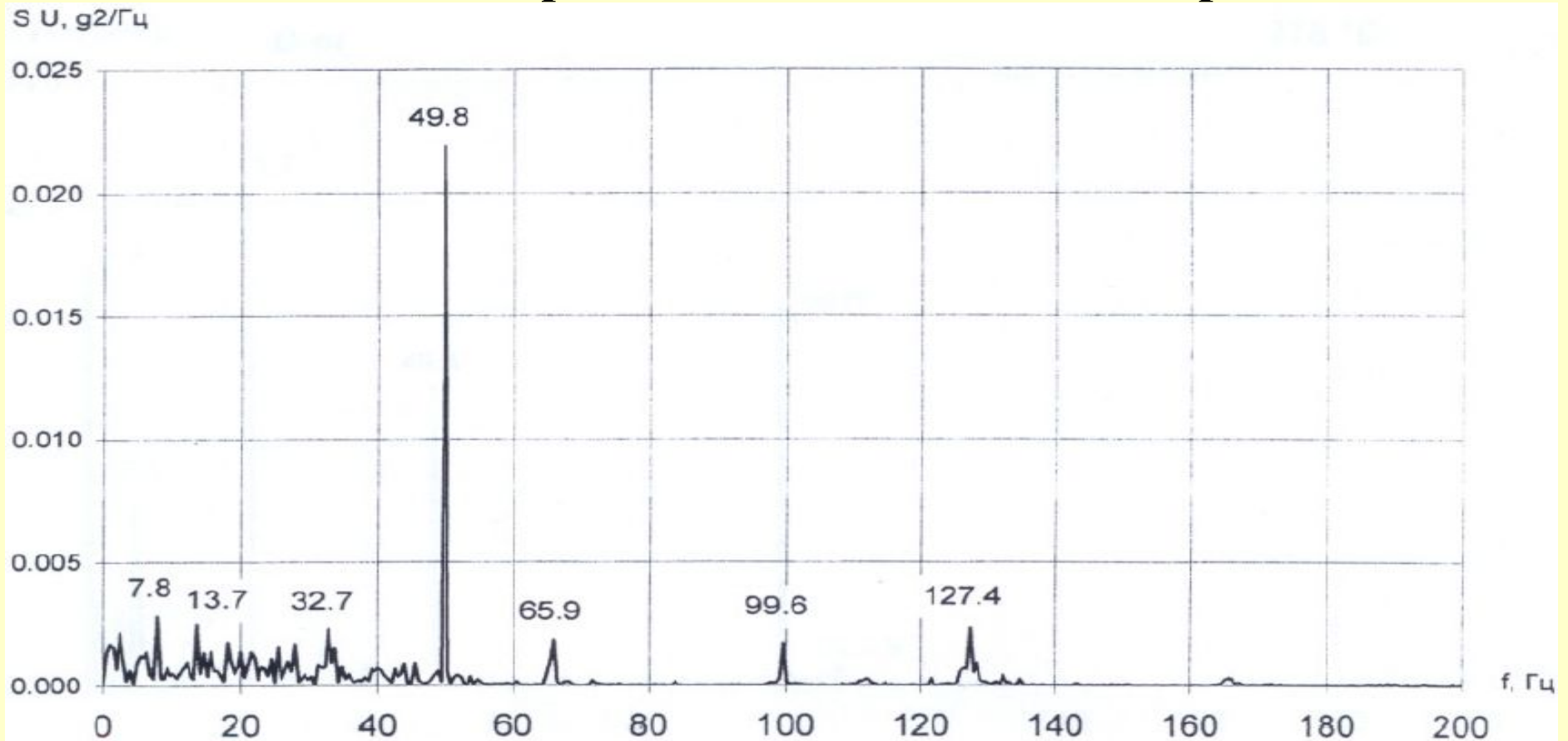
- При рассмотрении результатов вибродинамических измерений полученных во время пусконаладочных работ на первом блоке Волгодонской АЭС обнаружены режимы, в которых происходит аномальный рост вибраций. Параметры теплоносителя в этих режимах приведены в таблице 1.



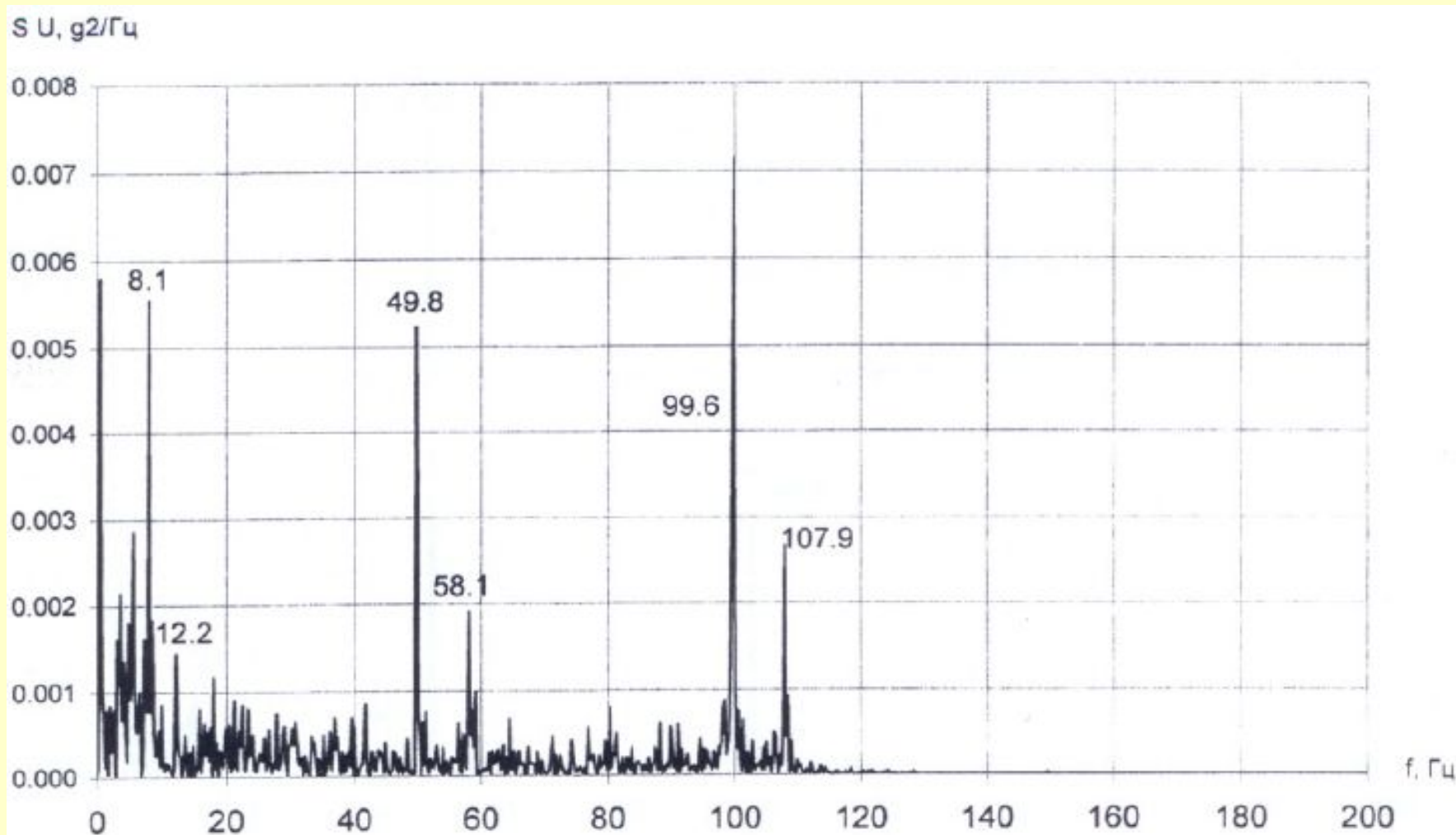
Таблица 1. Параметры теплоносителя в режимах с высоким уровнем вибраций.

№ режима	Параметры теплоносителя		
	Давление, р [МПа]	Температура теплоносителя, t [°C]	
		На входе в реактор	На выходе из реактора
1	15,9	270	270
2	16,0	278	281
3	16,0	285	314

**Режим №1. Рисунок 1. СПМ (спектральная плотность мощности) виброускорений. интенсивность колебаний на частоте 49,8 Гц превышает остальные на порядок**

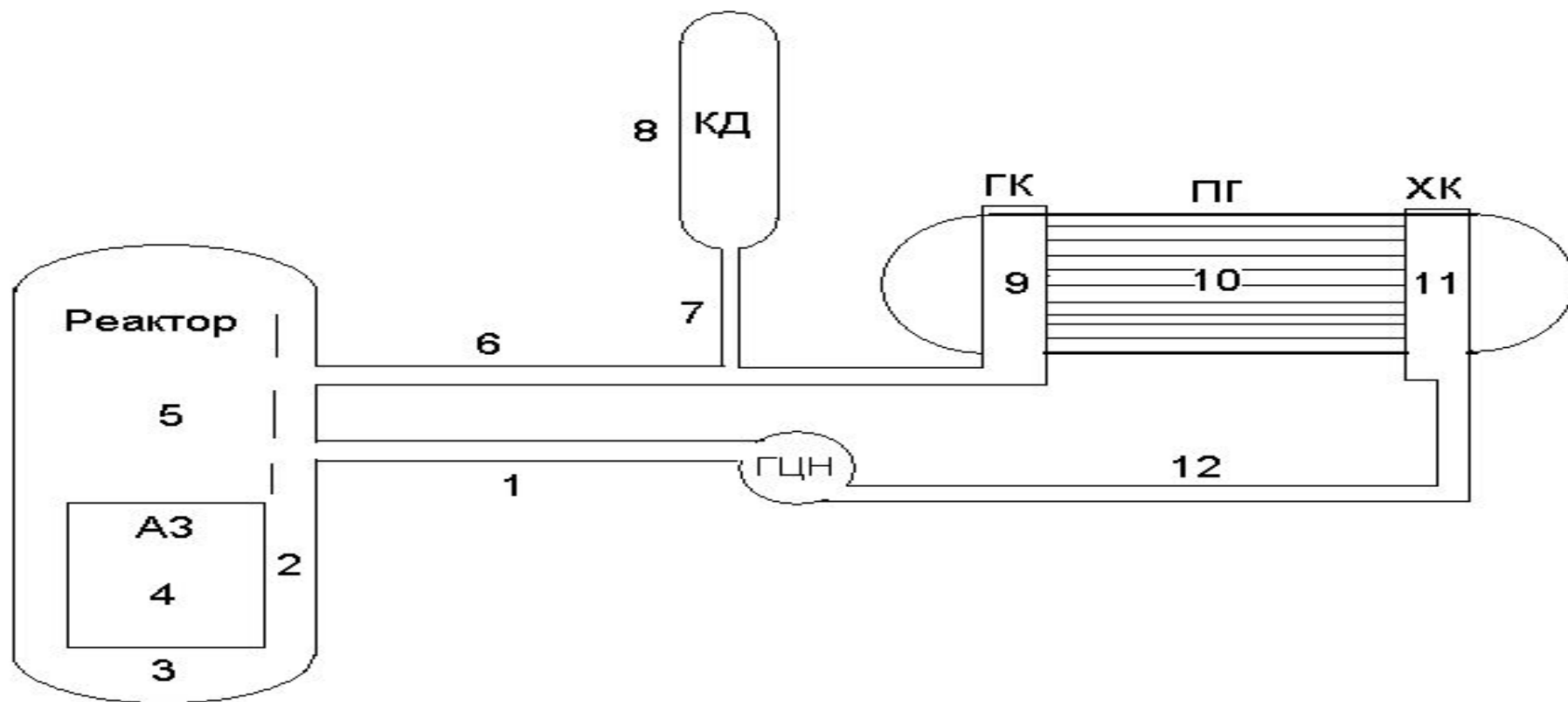


При малой мощности реактора значение пика на частоте 49,8 Гц уменьшается примерно в 5 раз. Рис 2. СПМ виброускорений от датчика, установленного на крышке реактора ( $p=16$  МПа,  $t_{гор.}=281^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{хол.}=278^{\circ}\text{C}$ ).



Для выявления причины появления аномальной интенсивности виброускорения проведен расчет СЧКДТ для всех участков однопетлевой акустической модели первого контура ВВЭР-1000 представленной на рисунке 3 .

Обозначения участков: “холодная нитка” от ГЦН до входного патрубка реактора – 1, опускной участок – 2, пространство под активной зоной – 3, активная зона – 4, пространство над активной зоной – 5, “горячая нитка” от выходного патрубка реактора до входа в горячий коллектор ПГ – 6, дыхательный трубопровод -7, компенсатор давления -8, горячий коллектор ПГ – 9, трубчатка ПГ – 10, холодный коллектор ПГ – 11, “холодная нитка” от выхода из холодного коллектора ПГ до ГЦН – 12.



Собственная частота колебаний давления теплоносителя в участках первого контура рассчитана по формуле:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{m \cdot C}} \quad (3)$$

Расчет акустической массы ( $m$ ) теплоносителя в участках первого контура проведен по формуле:

- $$m = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (1)$$

- Расчет акустической емкости ( $C$ ) теплоносителя в участках первого контура проведен по формуле:

$$C = \frac{S \cdot l}{\rho \cdot a^2} \quad (2)$$

- где  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $l$  – длина колебательного контура, м;  $S$  – площадь проходного сечения, м<sup>2</sup>,  $a$  – скорость звука в теплоносителе, м/с.

Расчитанное значение СЧКДТ в активной зоне в условиях нулевой мощности реактора равно 49,3 Гц, а в условиях номинальной мощности реактора равно 11,3 Гц.

**расчет показывает, что при нулевой мощности реактора СЧКДТ активной зоны практически совпадает с утроенной оборотной частотой вращения ГЦН, что приводит к многократному росту амплитуды колебаний давления.**

Доминирующий в спектрах пик, соответствующий третьей гармонике оборотной частоты ГЦН, равной 49,8 Гц, при фактическом отсутствии пика, соответствующего оборотной частоте ГЦН, свидетельствует о наличии резонанса **вибраций крышки реактора с вынужденными колебаниями давления теплоносителя.**

- Из сопоставления интенсивностей виброускорений, измеренных на крышке реактора в разных режимах, представленных на рисунках 1 и 2, сделаны следующие выводы.
- **Аномальный уровень виброускорений, показанный на рисунке 1, обусловлен совпадением частоты вынужденных колебаний давления теплоносителя, вызванных вращением ГЦН с частотой акустических колебаний в активной зоне и с частотой виброускорений крышки реактора.**
- Высокий уровень виброускорений крышки реактора показанный на рисунке 2 обусловлен только совпадением частоты колебаний теплоносителя, вызванных внешним источником, т.е. ГЦН, с частотой виброускорений крышки реактора.
- **В результате проведенного анализа установлено, что причиной аномального роста виброускорений в режиме 1 является резонанс вибраций крышки реактора с акустическими колебаниями теплоносителя в активной зоне реактора и совпадением частоты колебаний теплоносителя, вызванных вращением ГЦН.**

- Режим №2.
- представлены спектры виброперемещений полученные при обработке сигналов от датчиков виброперемещения установленных на всасе ГЦН (рис. 4) и на напоре (рис. 5).
- Из рис. 4 видно, что **на всасе ГЦН интенсивность вибраций на частоте 16,6 Гц является доминирующей и её величина на порядок выше других. В спектре виброперемещений, полученных от сигнала датчика расположенного на напоре ГЦН, интенсивность виброперемещений на частоте 16,6 Гц, приблизительно, на порядок меньше равна (рис. 5).**
- Рассчитанная СЧКДТ в акустическом контуре образованном участками 11 и 12 , т.е. состоящим из холодного коллектора и всасывающего трубопровода ГЦН, равна 8,3 Гц.



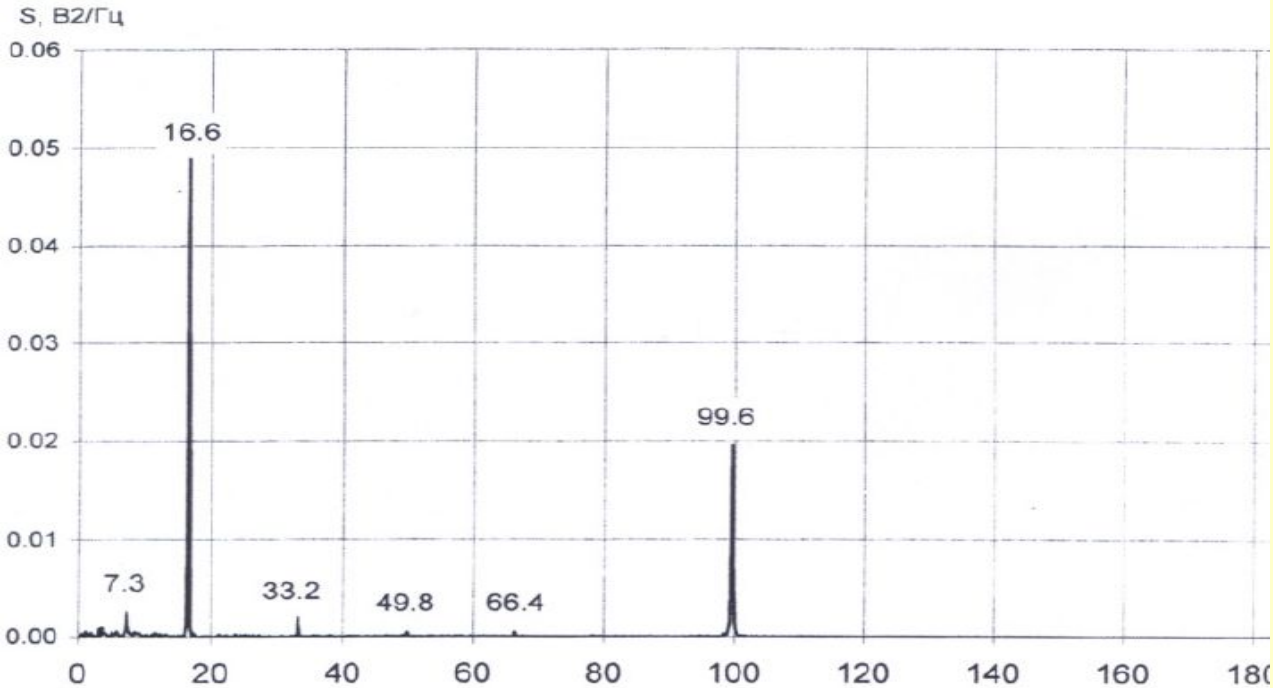


Рисунок 4.  
СПМ-(спектральная  
плотность мощности)  
виброперемещений (всас  
ГЦН).

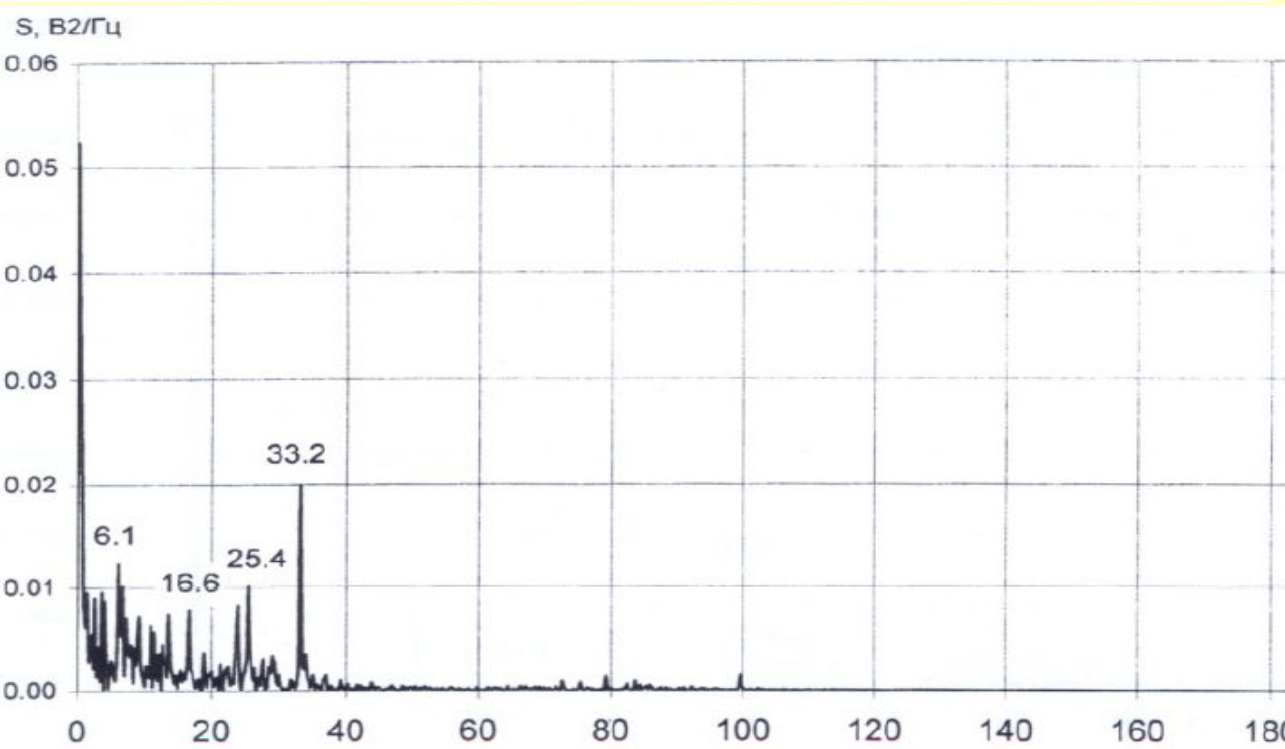


Рисунок 5. СПМ  
виброперемещений  
(напор ГЦН).

- при наличии в рассматриваемом контуре акустических колебаний с частотой  $f = 8,3$  Гц и при квадратичной зависимости перепада давления от скорости происходит удвоение частоты, в результате чего в спектре возникают колебания с частотой 16,6 Гц, которая равна оборотной частоте ГЦН. Такое преобразование СЧКДТ приводит к её полному совпадению с оборотной частотой ГЦН и возникновению в гидравлическом контуре образованном холодным коллектором парогенератора и трубопроводом, соединяющим его с ГЦН резонанса частоты акустических колебаний с частотой вынужденных колебаний обусловленных вращением ГЦН.

- **Проведенный анализ позволяет установить причину того, что в режиме № 2 происходит ускоренная деградация**
- **сварных швов соединяющих холодный коллектор парогенератора с трубопроводом,**
- **узлов крепления крышки к коллектору парогенератора**
- **и повышенный вибрационный износ ГЦН.**

## Режим №3.

- СПМ сигналов от одного и того же датчика пульсации давления, установленного на выходе из реактора приведены на рисунках 6-8.
- Главное отличие в эксплуатационных режимах, при которых получены эти результаты, состоит в различном уровне мощности реактора. Наименьшей мощности реактора соответствует рисунок 6. Промежуточному значению мощности соответствует рисунок 7, а максимальному значению мощности - рисунок 8.

$\Delta P, \text{kPa}^2/\text{Hz}$

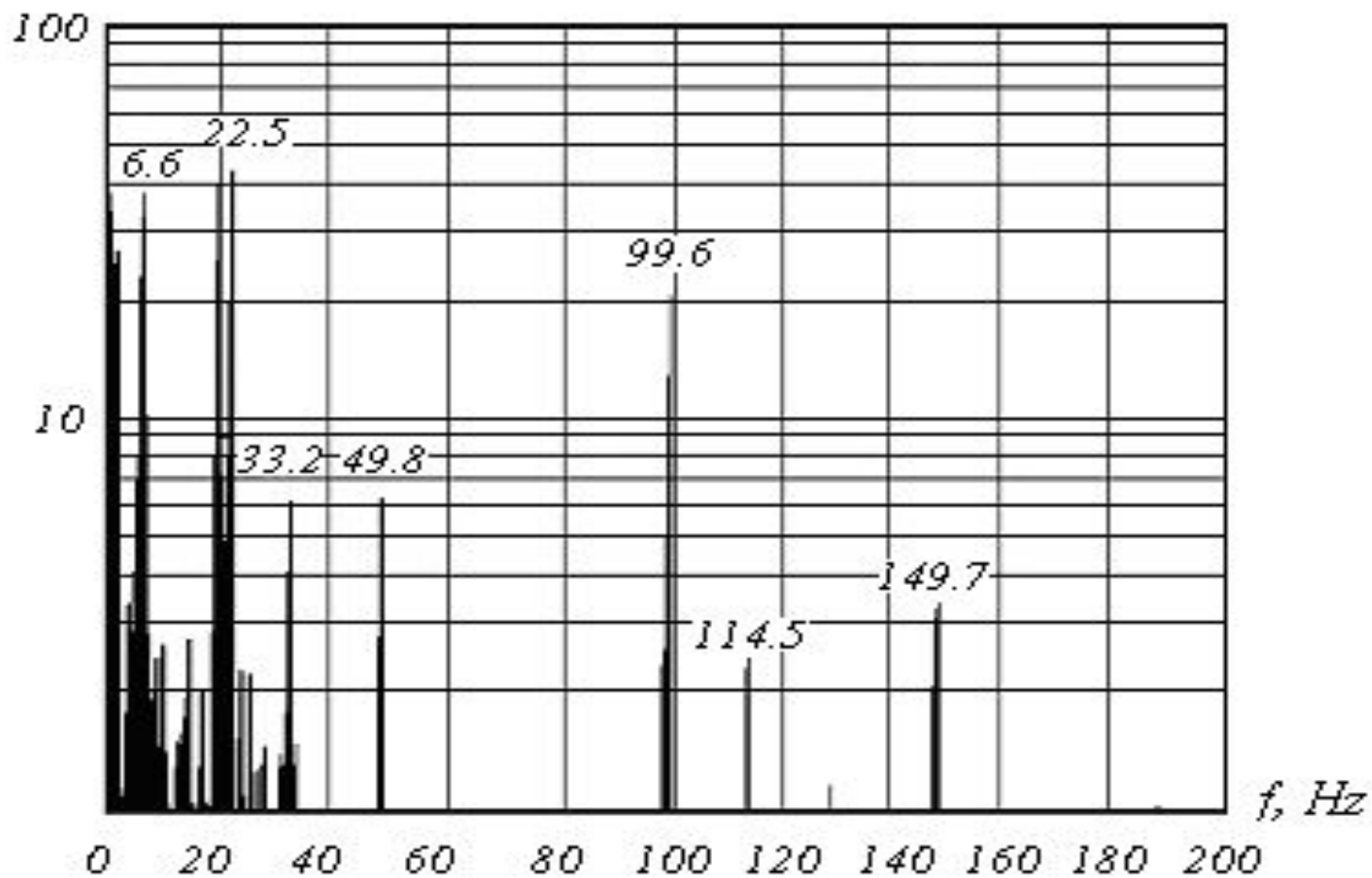


Рис.6 СПМ теплоносителя при давлении  $P=16\text{МПа}$  температуре на выходе из реактора  $T_{\text{вых}}=301^\circ\text{C}$  и входе в реактор  $T_{\text{вх}}=284^\circ\text{C}$ .

$\Delta P, \text{ kPa}^2/\text{Hz}$

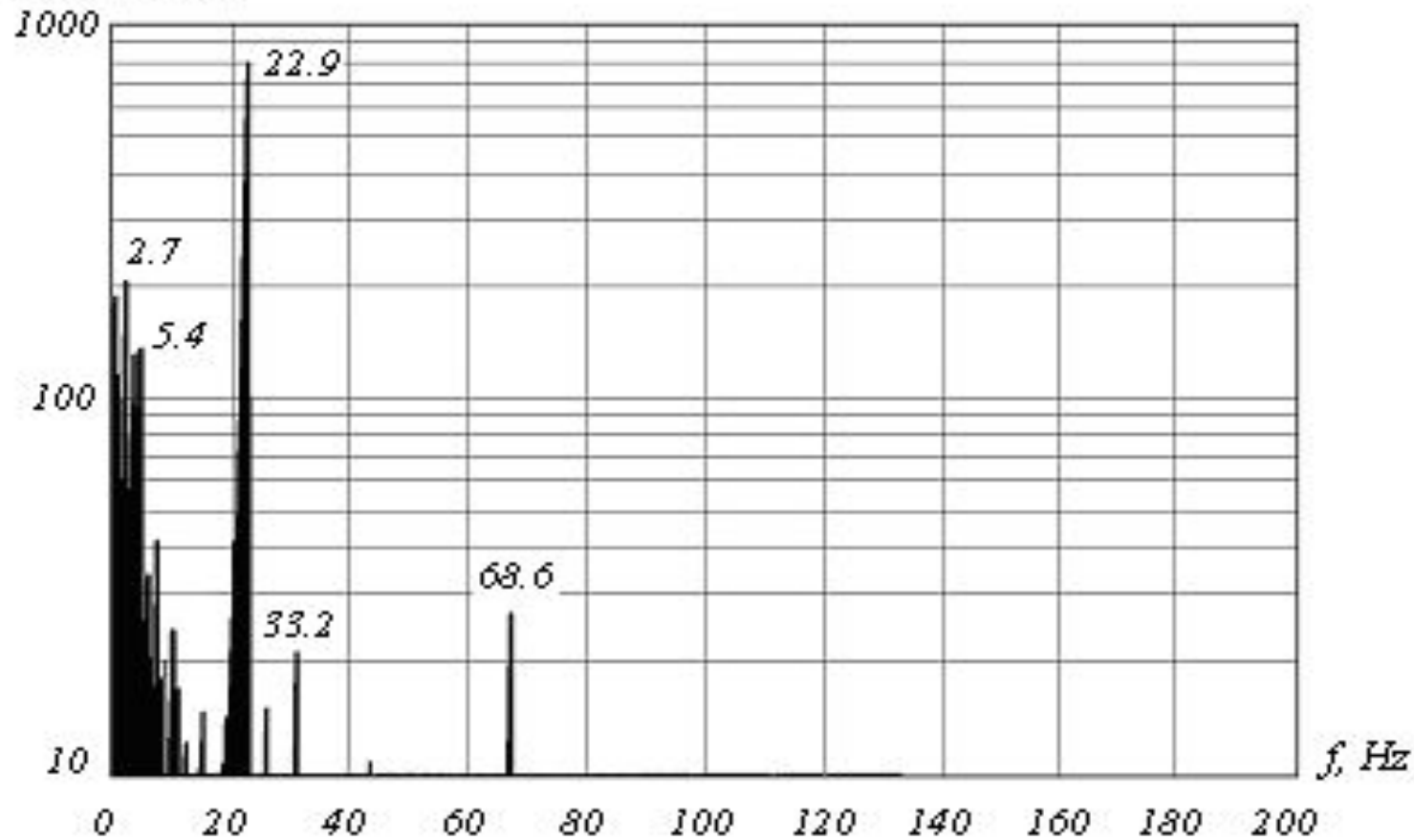


Рис. 7. СПМ теплоносителя при давлении  $P=16\text{MPa}$  температуре на выходе из реактора  $T_{\text{вых}}=314^\circ\text{C}$  и входе в реактор  $T_{\text{вх}}=285^\circ\text{C}$ .

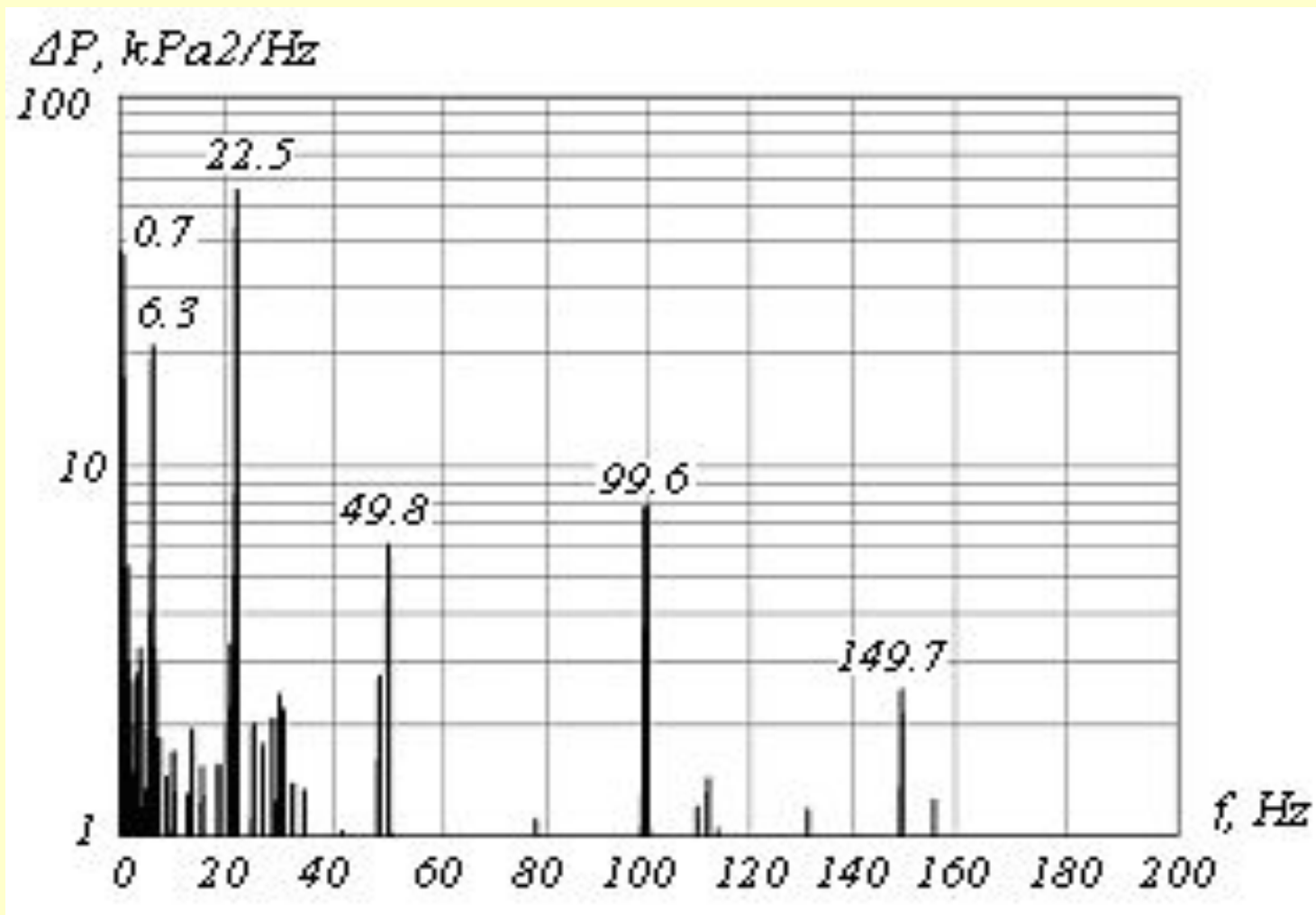


Рис. 8. СПМ теплоносителя при давлении  $P=16\text{МПа}$  температуре на выходе из реактора  $T_{\text{вых}}=318^\circ\text{C}$  и входе в реактор  $T_{\text{вх}}=287^\circ\text{C}$ .



- На Рис. 7 показаны аномально высокие значения СПМ сигналов от датчика пульсации давления в режиме №3 по сравнению с СПМ представленными на рисунках 6, 8.
- Из Рис. 7 видно, что наибольшая интенсивность пульсаций давления теплоносителя в СПМ наблюдаются при частотах 2,7 Гц; 5,4 Гц и 22,5 Гц.
- Поскольку ни одна из этих частот не является кратной или комбинационной частотой пульсаций давления теплоносителя, обусловленным вращением ГЦН, можно предположить, что колебания давления на этих частотах создаются внутренними источниками возмущений.

- Собственная частота колебаний шахты активной зоны равна 22,2 Гц, а одна из собственных частот колебаний ТВС примерно равна 5,4 Гц.
- Эти данные позволяют предположить, что причиной возникновения колебаний теплоносителя на частоте 5,4 Гц являются вибрации ТВС, а на частоте 22,5 Гц – вибрации шахты активной зоны.

Расчеты показывают, что

- при массовом значении паро – газо - содержания в теплоносителе порядка  $X=10^{-4}$  в смежных акустических контурах имеет место двукратное отношение частот колебаний давления теплоносителя.
- Первый из этих контуров теплоносителя образован, согласно обозначениям на Рис.3, активной зоной (участок 4) ,
- второй контур состоит из активной зоны (участок 4), опускного участка (участок 2), участка под активной зоной реактора (участок 3 ).

# Скорость звука в газожидкостной среде определяется концентрацией газовой фазы

- следовательно, и податливость объема заполненного этой средой так же зависит от концентрации газовой фазы. СЧКДТ ВВЭР-1000 равная 11,3 Гц в определена как первая корпусная акустическая стоячая волна.
- Известно, что образование газовой фазы продуктов радиолиза воды обусловлено кипением теплоносителя.
- Поскольку кипение теплоносителя в активных зонах реакторов ВВЭР и РWR в условиях нормальной эксплуатации отсутствует, принято считать, что в пределах активной зоны теплоноситель однофазный.

- **Однако данные измерений первой корпусной акустической стоячей волны при работающем реакторе, как показали расчеты СЧКДТ в активной зоне, соответствуют двухфазному состоянию теплоносителя.**
- **Акустический контур активной зоны представляет собой колебательную систему с переменной податливостью, меняющейся по синусоидальному закону .**
- **Такое изменение податливости обусловлено синусоидальным характером изменения давления, следствием которого является соответствующее изменение нейтронного потока.**
- **В результате периодического изменения нейтронного потока происходит периодическое изменение переменной составляющей концентрации газовой фазы в теплоносителе, которое и приводит к периодическому изменению акустической податливости в указанных колебательных контурах.**
- **Этими закономерностями и обусловлено появление в колебательном контуре переменной составляющей податливости изменяющейся с той же частотой, с которой происходят колебания давления в теплоносителе активной зоны.**

- Проведем оценку частот собственных колебаний теплоносителя в комбинированном контуре, образованном участками 2,3,4 и участком 4.
- Для проведения расчетных оценок рассмотрим следующие режимы:
- Режим № 4  $P=16$  МПа,  $t_{вх} = 284$  С,  $t_{вых} = 301$  С;
- Режим № 3  $P=16$  Мпа,  $t_{вх} = 285$  С;  $t_{вых} = 314$  С;
- Режим № 5  $P=16$  Мпа,  $t_{вх} = 287$  С;  $t_{вых} = 318$  С;
- **при теплофизических параметрах теплоносителя в режиме № 3 и массовом газосодержании  $X=10^{-4}$  расчетная скорость звука в теплоносителе активной зоны равна 119 м/ с, а соответствующая ей величина СЧКДТ в первом акустическом контуре (участок 4) равна 5,4 Гц, а во втором акустическом комбинированном контуре (участок 2,3,4) – 2,7 Гц.**

Таблица №2. Частоты собственных колебаний давления теплоносителя

Режим	Участок 2,3,4			Участок 4		
	$m,$ [кг/м <sup>4</sup> ]	$c \cdot 10^7,$ [м <sup>4</sup> · с <sup>2</sup> /кг]	$f,$ [Гц]	$m,$ [кг/м <sup>4</sup> ]	$c \cdot 10^7,$ [м <sup>4</sup> · с <sup>2</sup> /кг ]	$f,$ [Гц]
№ 4	7455	7,81	2,1	1995	7,58	4,1
№ 3	7407	4,69	2,7	1947	4,46	5,4
№ 5	7402	4,20	2,8	1942	3,97	5,7

где  $m$  – акустическая масса,  $c$  – акустическая податливость и  $f$  – СЧКДТ.

- В указанных колебательных контурах отношение частот равно двум, что приводит к двукратному изменению акустической податливости в контуре 2 за один период его колебаний, т.е. одно из условий параметрического резонанса выполняется.
- Величина модуляции податливости мала по сравнению с критическим значением, по достижении которого возникает параметрический резонанс.
- Ввиду этого происходит лишь усиление колебаний давления на резонансных частотах в режиме № 3 по сравнению с режимами № 4 и № 5.
- Этот вывод подтверждается результатами измерений, приведенными на рисунках 6-8. Для исследования причин появления аномально высоких пульсаций давления на частоте равной 5,4 Гц проведен расчет СЧКДТ, добротности и полосы пропускания для участка 4.



- Для исследования причин появления аномально высоких пульсаций давления на частоте равной 5,4 Гц проведен расчет СЧДТ, добротности и полосы пропускания для участка 4.
- **Расчет добротности колебательного контура (Q) производится по следующей формуле:**

$$Q = \frac{\rho \cdot a \cdot W_{об}}{S \cdot \Delta P} \quad (5)$$

- где,  $\rho$ , [кг/м<sup>3</sup>] – плотность теплоносителя;  $a$ , [м/с] – скорость звука в потоке теплоносителя;  $W_{об}$ , [м<sup>3</sup>/с] – объемная скорость теплоносителя;  $S$ , [м<sup>2</sup>] – площадь поперечного сечения участка;  $\Delta P$ , [Па] – гидравлическое сопротивление в контуре.

# Полоса пропускания(ПП)

- **Расчет ПП :**

$$(f_2 - f_1) = \frac{f_0}{Q} \quad (6)$$

- **где,  $(f_2 - f_1)$ , [Гц] – полоса пропускания;  $f_0$ , [Гц] – собственная частота колебания давления теплоносителя;  $Q$  - добротность.**
- **Результаты расчета СЧКДТ, добротности и ПП в режимах № 4, № 3, № 5 представлены в таблице 3. Из таблицы 3 следует, что величина ПП для СЧКДТ в активной зоне зависит от режима работы АЭС. Левая и правая половины ПП для режима № 3 равны  $1,48\text{Гц}/2=0,74\text{Гц}$ .**
- **нижняя граница ПП соответствующая частоте 5,2 равна  $(5,2 - 0,74)$  Гц = 4,46 Гц, а верхняя граница ПП  $(5,2 + 0,74)$  Гц = 5,94 Гц.**
- **Следовательно, СЧКДТ равные 3,6 Гц и 6,7 Гц находятся вне ПП.**

Таблица №3. Результаты расчета СЧКДТ, добротности и ПП.

Режим	Скорость звука, а м/с	СЧКДТ, Гц	Добротность, Q	Полоса пропускания, Гц
№ 4	80	3,6	2,4	1,5
№ 3	119	5,2	3,5	1,48
№ 5	149	6,7	4,3	1,55

- **Проведенные расчеты подтверждают сделанное ранее предположение о том, что СЧКДТ в режимах № 4 и № 5 выходят из области резонансного взаимодействия с вибрациями ТВС, частота которых равна 5,4 Гц. Результаты измерения СПМ на реакторной установке ВВЭР-1000 в режимах № 4 и № 5, представленные на рисунках 6 и 8, подтверждают этот вывод.**
- **Размер ПП показывает, что режим резонансного взаимодействия возникает в узком диапазоне изменения частот около значения 5,4 Гц и при более значительных изменениях СЧКДТ, соответствующих значениям 3,6 Гц и 6,3 Гц пропадает.**

**Приведенные выше результаты анализа являются подтверждением того что интенсивность вибраций возрастает при возникновении виброакустического резонанса, при котором частоты вибраций конструкции или ее элемента попадают в полосу пропускания частот акустических колебаний теплоносителя.**

**Частота акустических колебаний теплоносителя в активной зоне, т.е. СЧКДТ в активной зоне зависит от величины скорости распространения волн давления (скорости звука) в теплоносителе активной зоне и ее геометрических размеров .**

**Скорость звука в теплоносителе активной зоны резко уменьшается при наличии в нем паровых и газовых пузырьков .**

- вскипание теплоносителя является необходимым условием для перехода газообразных продуктов радиолиза в реакторе ВВЭР-1000 из растворенного состояния в газовую фазу.
- **Вскипание теплоносителя при работе реактора возникает в узком зазоре между наружной поверхностью тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) и прилегающими элементами 15-ти дистанционирующих решеток (ДР), равномерно расположенных по высоте.**
- **При выходе из зазора пузырьки пара конденсируются, т. к. попадают в поток недогретого до температуры насыщения теплоносителя.**

- **Существующие методы оценки количества образующейся в зазоре паровой и газовой фазы дают приближенные результаты. По оценкам средние по объему активной зоны весовые концентрации газовой фазы находятся в диапазоне  $10^{-5}$  –  $10^{-3}$  и зависят от уровня мощности реактора и геометрии зазора.**
- **Присутствие пузырьков пара и газов в теплоносителе существенно влияет на его упругие свойства, что проявляется в уменьшении скорости распространения звука в двухфазном теплоносителе, и приводит к возникновению более низких значений СЧКДТ, чем в однофазном водяном теплоносителе.**
- **Следствием этого является существенные изменения в СПМ сигналов от датчиков пульсаций давления теплоносителя в рабочих режимах по сравнению с СПМ, измеренными при отсутствии продуктов радиолиза в процессе пуско-наладочных работ при нулевой мощности реактора.**



## **прогнозирование числа и места ТВС, которые будут испытывать повышенные вибрации**

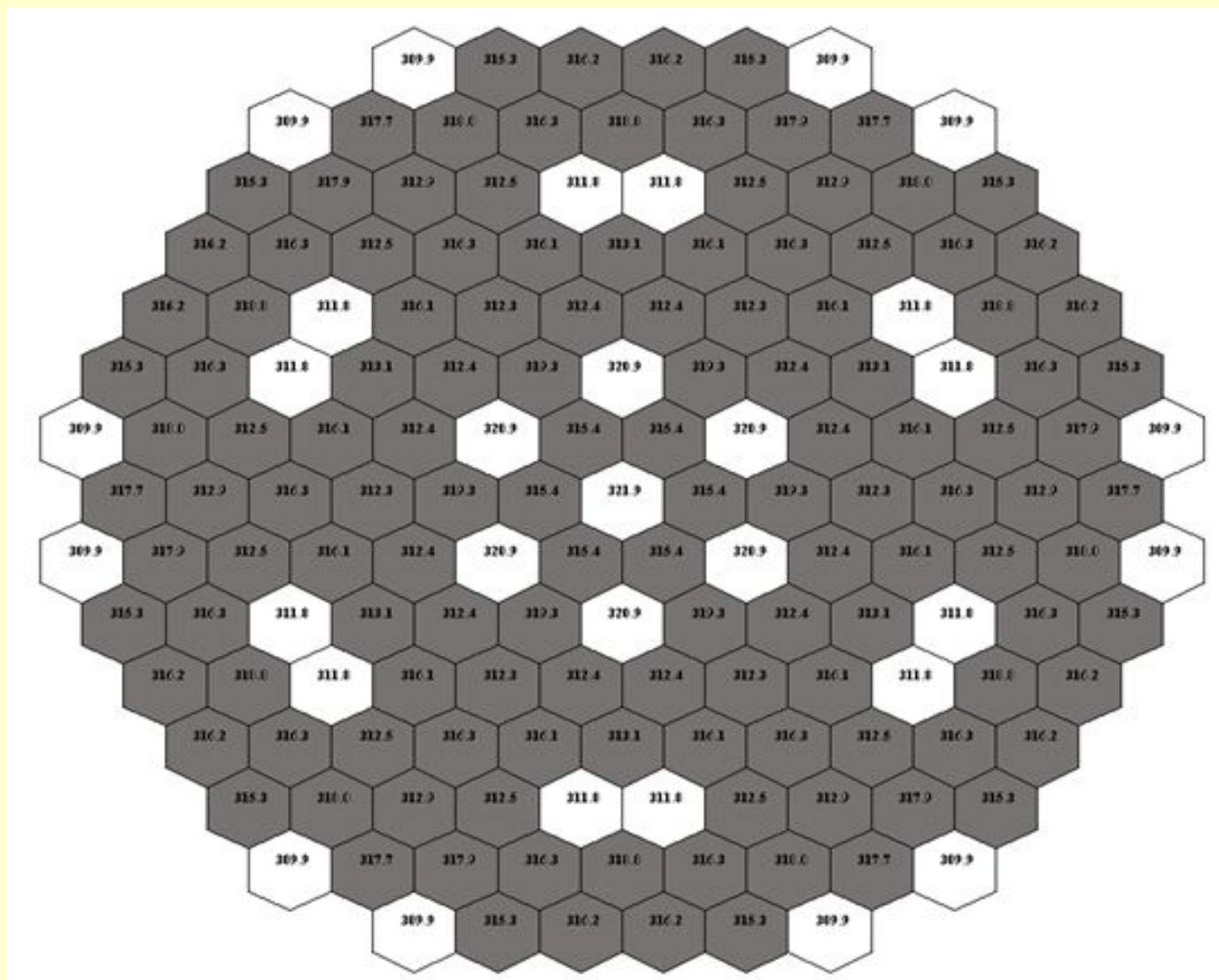
- На рис. 9 – 11 приведены примеры практического использования результатов расчета СЧКДТ, добротности, ПП для прогнозирования числа и места расположения в активной зоне ТВС, которые будут испытывать повышенные вибрации в режимах № 4, № 3, № 5 .
- **ТВС с повышенным уровнем вибраций выделены темным цветом.** Эти результаты получены путем использования программного комплекса «РАДУГА-7.3», предназначенного для моделирования динамических процессов в реакторных установках с реакторами типа ВВЭР – 1000 с шестигранными в плане тепловыделяющими сборками

- На этих рисунках **темным цветом выделены ТВС, которые согласно прогнозам будут находиться в условиях повышенных вибраций.**
- С учетом регламента эксплуатации АЭС и на основе результатов прогнозирования режимов, в которых возникает повышенный уровень вибраций ТВС, можно оценить интервал времени, в течение которого из-за виброакустического резонанса будет происходить повышенный износ ТВС реактора ВВЭР-1000.

# **ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ МОЖЕТ БЫТЬ ОСУЩЕСТВЛЕНО СРЕДСТВАМИ ШТАТНЫХ СИСТЕМ АСУТП**

- Предотвращение условий эксплуатации, приводящих к повышению вибраций из за возникновения виброакустических резонансов в первом контуре АЭС с ВВЭР-1000 должно быть обеспечено:**
- ПУТЕМ ВНЕСЕНИЯ ДОПОЛНЕНИЙ В РЕГЛАМЕНТ ЭКСПЛУАТАЦИИ**
- И МОЖЕТ БЫТЬ ОСУЩЕСТВЛЕНО СРЕДСТВАМИ ШТАТНЫХ СИСТЕМ АСУТП АЭС ВВЭР-1000.**

Рис. 9. Расположение ТВС с повышенным уровнем вибраций в активной зоне ВВЭР - 1000 в режиме № 3 (прогноз):  $P=16$  Мпа,  $t_{вх} = 285$  С;  $t_{вых} = 314$  С;



Рису. 10. Расположение ТВС с повышенным уровнем вибраций в активной зоне ВВЭР - 1000 в режиме № 4 (прогноз):  $P=16$  МПа,  $t_{вх} = 284$  С,  $t_{вых} = 301$  С.

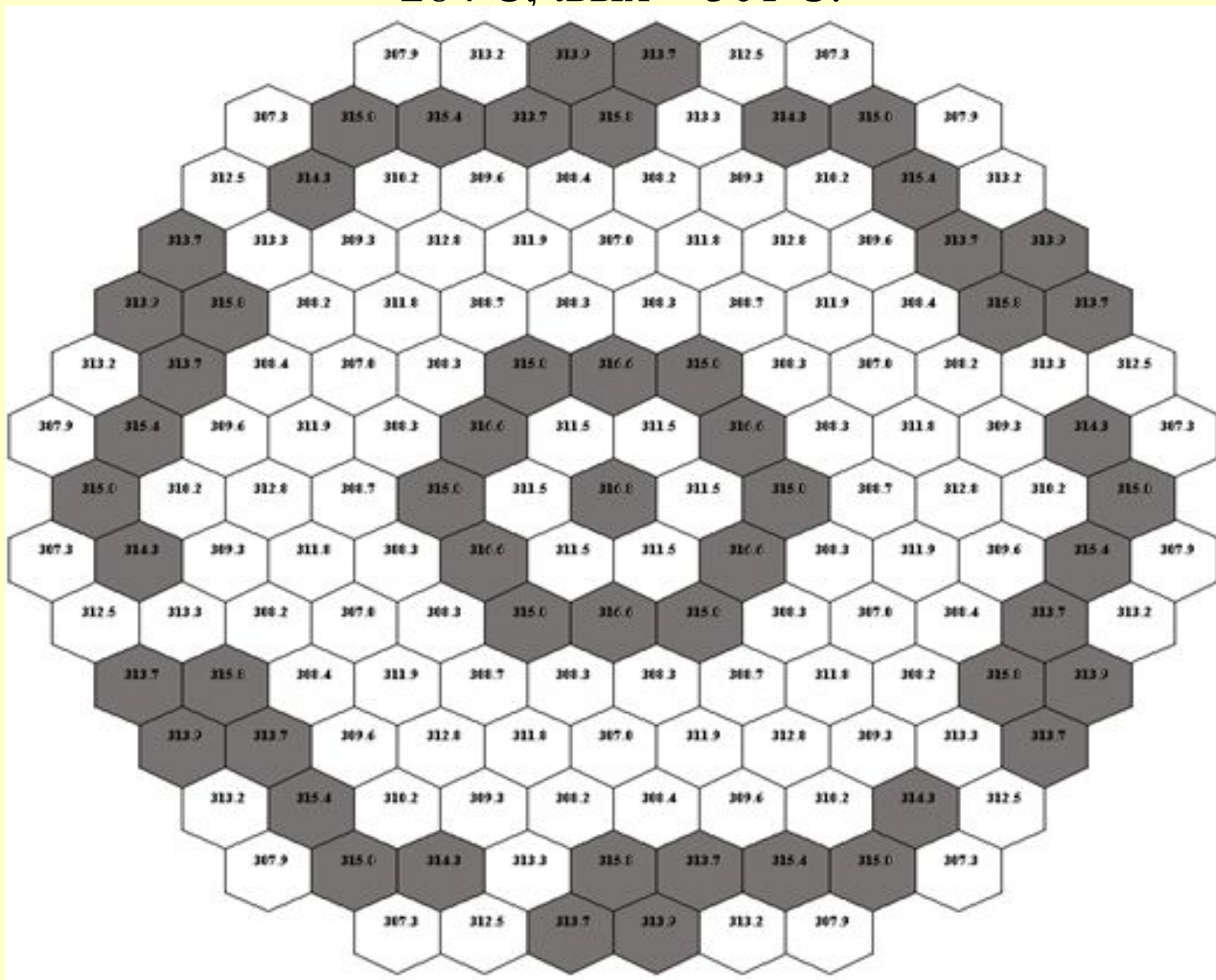


Рис. 11. Расположение ТВС с повышенным уровнем вибраций в активной зоне ВВЭР - 1000 в режиме № 5 (прогноз):  $P=16$  Мпа,  $t_{вх} = 287$  С;  $t_{вых} = 318$  С.

