

## ПОЛЕ АКУСТИЧЕСКИХ СТОЯЧИХ ВОЛН В КОНТУРАХ ЦИРКУЛЯЦИИ ВВЭР

© 2025 г. Г. В. Аркадов<sup>а</sup>, \*, М. Т. Слепов<sup>б</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Некоммерческое партнерство содействия развитию системной инженерии “РАЙЗ”,  
Зеленый просп., д. 5/12, стр. 3, Москва, 111141 Россия

<sup>б</sup>Нововоронежская АЭС, филиал АО “Концерн Росэнергоатом”,  
пром. зона Южная, д. 1, г. Нововоронеж, 396071 Россия

\*e-mail: arkgen47@gmail.com

\*\*e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию 02.09.2024 г.

После доработки 26.11.2024 г.

Принята к публикации 04.12.2024 г.

Многие исследовательские коллективы и группы уделяют большое внимание вопросам гидродинамического воздействия на оборудование ядерных энергетических установок (ЯЭУ), что находит отражение в многочисленных публикациях: монографиях, статьях, обзорах. Однако, несмотря на наличие теоретических работ по данной проблеме, вопросы, связанные с прикладными исследованиями, т.е. непосредственно с прямыми измерениями, остаются вне сферы научных интересов отечественных и зарубежных ученых. Необходимость их практического изучения обуславливается прежде всего сложностью интерпретации выявляемых разнообразных аномалий, требованиями к точной настройке различных моделей, существенными различиями в спектральных образах оборудования не только в рамках различных проектов реакторных установок (РУ), но и в однотипных энергоблоках в пределах одной АЭС. Указанные проблемы невозможно решить с помощью только теоретических или расчетных методов или с использованием программных средств имитационного моделирования. Положение усугубляется еще и тем, что процесс проведения исследований — сложнейшая задача как по выбору источников данных, так и по интерпретации полученной информации. Скорее всего, именно этими факторами объясняется существенное снижение интереса к экспериментальным работам по виброакустической тематике на различных РУ как в России, так и в других странах. В статье в краткой форме представлены некоторые результаты изучения поля акустических стоячих волн (АСВ) в главном циркуляционном контуре (ГЦК) реакторной установки с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР-1200) на примере энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2, а также описаны основные типы АСВ.

*Ключевые слова:* акустическая стоячая волна, главный циркуляционный контур, главный циркуляционный насосный агрегат, ВВЭР-1200, цифровая акустическая модель ядерного реактора, вибрация, датчик пульсации давления

**DOI:** 10.56304/S0040363625700778

При проектировании новых энергоблоков невозможно обосновать ресурс оборудования только расчетными методами, так как априори неизвестно, какие будут достигнуты амплитуды и частоты вибраций различных элементов реакторной установки. Эти недостающие сведения можно получить только путем прямых измерений при вводе энергоблока в эксплуатацию, в ходе последующей штатной эксплуатации, а также посредством дополнительных измерений. Данный подход проанализирован в работах [1–6].

Без понимания природы происхождения того или иного резонанса нельзя спрогнозировать его динамику в процессе нормальной эксплуатации энергоблока. Износ подвижных опор основного

оборудования ГЦК, снижение жесткости узлов крепления внутрореакторных устройств и корпуса РУ, увеличение/уменьшение объемной доли паровой фазы теплоносителя при эксплуатации РУ и другие факторы приводят к изменению соответствующих резонансных частот. Но если механические колебания оборудования с некоторыми оговорками моделируются на масштабных стендах, то с моделированием гидродинамических воздействий возникают большие проблемы (подробнее в [3–8]). Длительное время гидродинамические эффекты в ГЦК вообще не принимались во внимание: считалось, что доминируют колебания на собственных частотах элементов оборудования (критика данного подхода отражена в [4–8]).

Следствием такого подхода является недооценка существующих обратных связей между нейтронно-физическими и теплофизическими процессами при колебаниях плотности теплоносителя, вызванных АСВ. На кафедре АЭС Московского энергетического института профессором, доктором техн. наук К.Н. Проскуряковым была создана цифровая акустическая модель ядерного реактора, позволяющая идентифицировать источники самовозбуждающихся АСВ и прогнозировать их частоту [9–12]. Данная модель представляет собой автоколебательную систему, относящуюся к особому классу нелинейных диссипативных систем, которые способны генерировать незатухающие колебания с параметрами, не зависящими от начальных условий и определяемыми только свойствами самой системы.

После длительных натурных измерений стало ясно, что именно гидродинамические эффекты в ГЦК определяют вибрационное состояние его элементов [3]. Во-первых, собственные колебания единственного элемента – понятие некорректное в условиях совместных колебаний элементов реальных конструкций. Во-вторых, частоты собственных колебаний элемента конструкции, полученные на стенде в отрыве от связей с другими элементами, нельзя применить для обоснования отстройки частот. Существует опасность того, что явления, зарегистрированные в стендовых условиях, не проявятся в натурных условиях (некоторые вопросы обсуждаются в [13]). В-третьих, в течение довольно продолжительного времени воздействию гидродинамических нагрузок на различное оборудование РУ не уделялось должного внимания, хотя порочность некоторых конструкторских решений, не учитывающих воздействие гидродинамических нагрузок, привела к отказам оборудования или преждевременному исчерпанию его ресурсных характеристик.

Конечно, любое резонансное явление считается недопустимым, и инженеры еще на стадии проектирования стремятся полностью исключить возможность совпадения частот различных колебательных процессов, однако этого не всегда удается избежать, особенно в случае виброакустических резонансов.

#### КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ И СУЩЕСТВОВАНИЯ АСВ

В данном разделе в краткой форме описывается волновое уравнение как фундаментальная основа теории акустики упругой среды, делается акцент на его решениях, зависящих от вида вынуждающей силы, при этом подчеркивается, что в любом случае в решении волнового уравнения

присутствует стоячая волна. Полная теоретическая проработка процесса формирования и существования АСВ приведена в монографии [3]. Волновое уравнение (уравнение Даламбера) для некоторой функции двух переменных  $U(x, t)$  имеет вид

$$\frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2} + f(x, t), \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $x$  – пространственная координата;  $C$  – скорость распространения продольной волны в среде;  $f(x, t)$  – внешнее вынуждающее воздействие.

Далее будет рассмотрено одно частное решение однородного волнового уравнения (1). Пусть двумерное поле времени и координаты  $U(x, t)$  имеет синусоидальный вид

$$U(x, t) = A \sin(\omega t + kx), \quad (2)$$

где  $A$  – амплитуда;  $k = \omega/C$  – волновое число;  $\omega$  – циклическая частота.

Продифференцировав  $U(x, t)$  по  $x$  и  $t$ , можно получить

$$\frac{dU}{dt} = A\omega \cos(\omega t + kx); \quad (3)$$

$$\frac{dU}{dx} = Ak \cos(\omega t + kx). \quad (4)$$

Физически это означает, что деформация среды  $\partial U/\partial x$  тем больше, чем выше скорость ее колебаний  $\partial U/\partial t$ . Для гармонических колебаний деформация максимальна при прохождении положения равновесия и минимальна при смене направления колебаний (при достижении максимума перемещений).

Проведя повторное дифференцирование выражений (3), (4):

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = -A\omega^2 \sin(\omega t + kx); \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = -Ak^2 \sin(\omega t + kx), \quad (6)$$

можно вывести волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2}. \quad (7)$$

Синусоидальное поле связывается не только волновым уравнением второго порядка, но и дифференциальными уравнениями в частных производных первого порядка:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = Ak \cos(\omega t + kx); \quad (8)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = A\omega \cos(\omega t + kx), \quad (9)$$

откуда следует

$$\frac{1}{c} \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (10)$$

Если решение уравнения (10) первого порядка своим аргументом определяет бегущую волну в одну сторону  $U(\omega t + kx)$ , например

$$U(x, t) = A \sin(\omega t + kx), \quad (11)$$

то при изменении направления движения волны  $U(\omega t - kx)$ , например

$$U(x, t) = A \sin(\omega t - kx), \quad (12)$$

изменяется и знак в левой части дифференциального уравнения:

$$-\frac{1}{c} \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (13)$$

Волновое уравнение второго порядка

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (14)$$

инвариантно к направлению движения. Вне зависимости от знака решением будет и прямая волна  $U(\omega t + kx)$ , и обратная  $U(\omega t - kx)$ .

Если подставить приведенные ранее выражения в однородное волновое уравнение (1), можно убедиться, что его частное решение записывается в виде

$$U(x, t) = \frac{1}{2} U_0(kx + \omega t) + \frac{1}{2} U_0(kx - \omega t), \quad (15)$$

где  $U_0$  – произвольная (не обязательно синусоидальная) функция.

Из решения (15) следует, что форма начального отклонения распространяется в неизменном виде в противоположных направлениях. Если еще упростить задачу и предположить, что начальное отклонение имеет синусоидальную форму

$$U(x, t) = \frac{1}{2} \sin(kx + \omega t) + \frac{1}{2} \sin(kx - \omega t), \quad (16)$$

то можно получить частное решение, которое является произведением двух синусоид:

$$U(x, t) = \sin(kx) \sin(\omega t). \quad (17)$$

Выражения (15), (17) – самая примитивная модель акустической стоячей волны, обнажающая суть явления АСВ. Никаких граничных условий в исходную модель не закладывалось, т.е. безграничную среду возмущают только начальным стационарным воздействием. Никаких отражений в однородной безграничной среде возникнуть не может, и, тем не менее, стоячие волны образуются как результат сложения двух бегущих в противоположных направлениях волн (подробнее в [3, 14]).

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТ

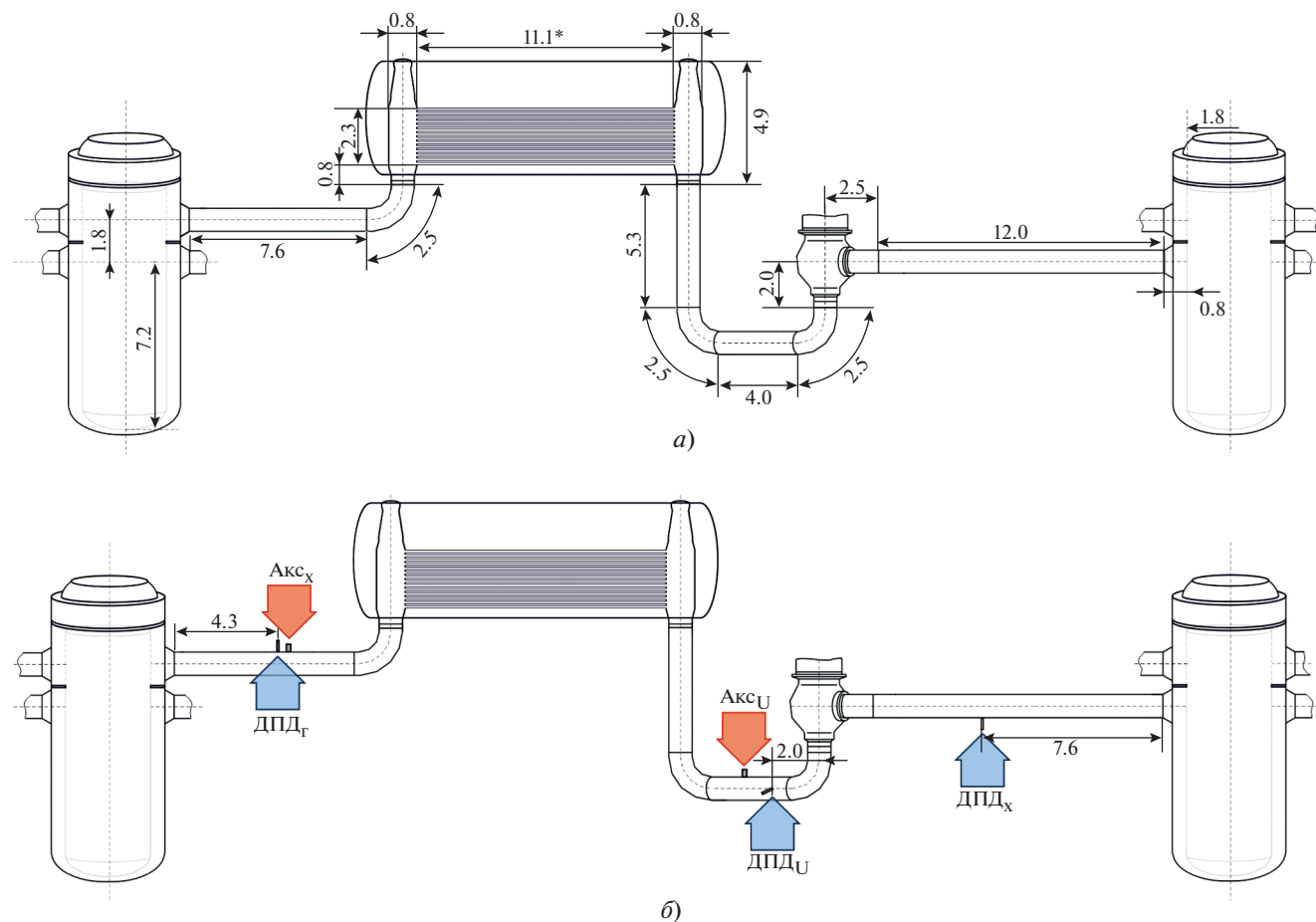
Центральная частота АСВ связывается с некоторой неизменной скоростью звука в среде и постоянным расстоянием, которое преодолела сначала падающая, а затем отраженная волна:  $f = c/\lambda$  [представление о траектории длиной  $\lambda$  (длине волны) – одномерное, а о параметрах  $f$  (частоте),  $c$  (скорости звука) – сугубо точечное]. Если неизменность скорости звука обосновывается предположением о неизменности всех перечисленных ранее параметров среды, то неизменность расстояния связывается с неизменностью длины полуволны АСВ между двумя акустическими неоднородностями. В трехмерных конструкциях акустических трактов между двумя самыми простыми неоднородностями в виде, например, торцевых стенок всегда существует континуальное множество различных путей “туда-обратно” падающих и отраженных волн, которые приводят к уширению резонансов АСВ.

Плоское представление теплообменной петли ВВЭР-1200 (энергоблок № 1 Нововоронежской АЭС-2) на рис. 1, а с реальными геометрическими размерами является, тем не менее, ее упрощенной разверткой. Это изображение довольно условно и только в общих чертах отражает размеры теплообменной петли с внесением некоторых обобщений. Например, коллекторы парогенераторов (ПГ) на схеме разнесены в пространстве на усредненную длину теплообменных трубок 11.1 м (средняя длина приведена главным конструктором РУ в описании парогенератора ПГВ-1000М), в реальности коллекторы расположены в непосредственной близости один от другого. На рис. 1, б также показаны схема размещения датчиков пульсации давления (ДПД) и акселерометров на ГЦК ВВЭР-1200.

Далее будет считаться, что по акустическим свойствам все теплообменные петли ГЦК тождественны одна другой. При последовательном контурном обходе теплообменной петли и реактора (по ходу движения теплоносителя) скачки сечения акустического тракта наблюдаются в элементах петли 1–7, представленных на рис. 2.

Всего в эксперименте по локализации поля АСВ на разных этапах было задействовано 12 каналов пульсации давления и 8 каналов вибрации, размещенных на трубопроводах ГЦК, а также 8 каналов вибрации и 8 каналов проксиметров, смонтированных на ГЦНА.

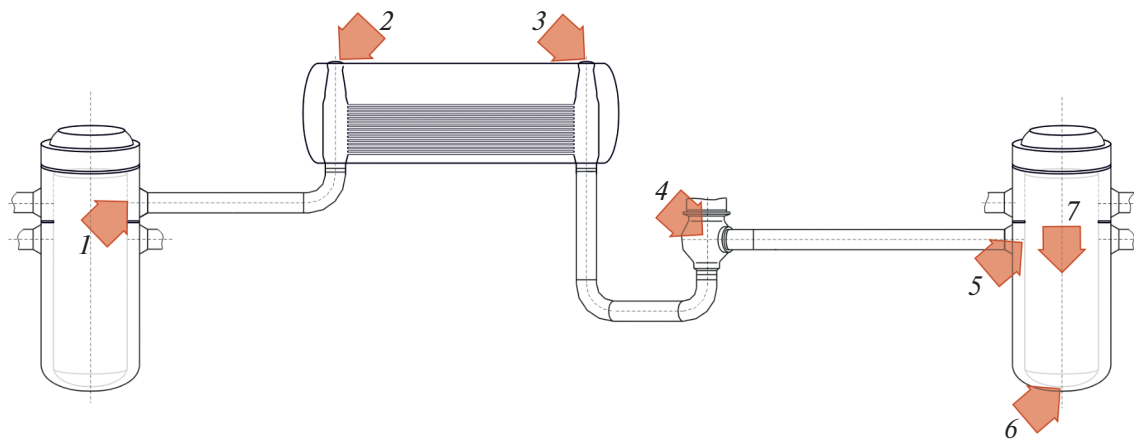
На основе обширного экспериментального материала можно сформулировать признаки АСВ как устойчивые закономерности для ГЦК реакторной установки любого проекта ВВЭР. Далее перечислены отличительные особенности АСВ, позволяющие выделить ее на фоне спектральных признаков, присущих другим процессам.



**Рис. 1.** Схематическое изображение теплообменной петли ГЦК ВВЭР-1200.

*a* – геометрические размеры; *b* – размещение первичных преобразователей (ДПД и акселерометры), задействованных в экспериментах.

ДПД<sub>Г</sub>, ДПД<sub>Х</sub>, ДПД<sub>У</sub> – датчик пульсации давления, размещенный на “горячей” и “холодной” нитке петли и на U-образном гйбе соответственно; Акс<sub>Х</sub>, Акс<sub>У</sub> – акселерометр, расположенный на “холодной” нитке и U-образном гйбе



**Рис. 2.** Семь акустических неоднородностей теплообменной петли ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000.

Объем: 1 – “горячего” выходного патрубка корпуса РУ; 2 – “горячий”, 3 – “холодный”; 4 – главный циркуляционный насосный агрегат (ГЦНА); 5 – “холодного” входного патрубка корпуса РУ; 6 – между днищем корпуса РУ и днищем шахты с центром на вертикальной оси симметрии реактора; 7 – реактора;

1. Ввиду глобальности процесса колебания на частотах АСВ в спектральных оценках ДПД практически всегда либо будут синфазны (разность фаз равна 0), либо будут находиться в противофазе (фаза  $180^\circ$ ). В некоторых особых ситуациях свойство АСВ иметь фазу равную 0 или  $180^\circ$  в разных точках ГЦК не соблюдается. Описанная особенность характерна для разветвленных контуров и связана с эффектом интерференции волн.

2. Фазовые характеристики постоянны для двух ДПД, а также для некоторой окрестности центральной частоты АСВ.

3. При увеличении/уменьшении температуры теплоносителя центральная частота АСВ претерпевает аналогичные изменения. Эффект вызван зависимостью скорости звука в теплоносителе от его температуры. Скорость звука зависит и от других параметров теплоносителя (концентрации борной кислоты и других химических реагентов, давления, содержания примесей), но максимальное воздействие на нее оказывает именно температура (подробнее в [3, 14] и частично в [15]).

Несмотря на общую схожесть проектов, новая РУ с ВВЭР-1200 отличается от серийной РУ с ВВЭР-1000 многими параметрами и конструктивными особенностями. Разница в массе и размерах может вызывать колебания на иных, ранее неизвестных частотах, хорошо изученных для РУ с ВВЭР-1000. Это, в свою очередь, может привести к совпадению частот собственных и вынужденных колебаний (резонансу), увеличению амплитуд колебаний, что в конечном итоге может негативно повлиять на ресурс оборудования. Особенно критичен вопрос возникновения резонансных явлений, связанных с совпадением собственных частот колебаний оборудования РУ с ВВЭР-1200 с частотами АСВ, так как ранее этому взаимодействию не уделяли должного внимания, а экспериментальных работ, посвященных исследованию РУ с ВВЭР-1200, не проводилось.

#### ПЕРВАЯ ПЕТЛЕВАЯ АСВ (АСВ<sub>1П</sub>)

Самая низкочастотная АСВ, затрагивающая всю длину циркуляционной петли, – первая петлевая АСВ. В качестве модели принимается следующее размещение узлов данной АСВ. Один узел находится на стенке шахты в точке выхода “горячего” коллектора, второй узел – аналогично первому, на стенке шахты, только в зоне “холодного” коллектора. При такой схеме пучность будет по середине петли – на участке от “холодного” коллектора ПГ до U-образного трубопровода. При дальнейшем изложении будет соблюдаться авторская кодировка мест установки датчиков пульсации давления по петле (см. рис. 1).

Процесс генерации АСВ<sub>1П</sub> довольно прост. Главный циркуляционный насосный агрегат, вы-

ступая в качестве генератора, создает бегущую волну пульсаций, которая, практически не встречая сопротивления, доходит до внутрикорпусной шахты. Эта шахта выступает как преграда, так как располагается перпендикулярно распространению потока. Отразившись, волна идет в обратном направлении до следующей преграды – той же шахты, но только со стороны “холодного” коллектора.

Между двумя областями отражающих поверхностей шахты располагается только разделитель потока. Частота колебаний АСВ<sub>1П</sub> регистрируется всеми датчиками петли. На рис. 3, а схематично показано расположение двух узлов и единственной пучности АСВ<sub>1П</sub> относительно основного оборудования, а также приведены нулевые фазовые характеристики  $\varphi$  между любыми парами сигналов датчиков пульсации давления, установленных в петле.

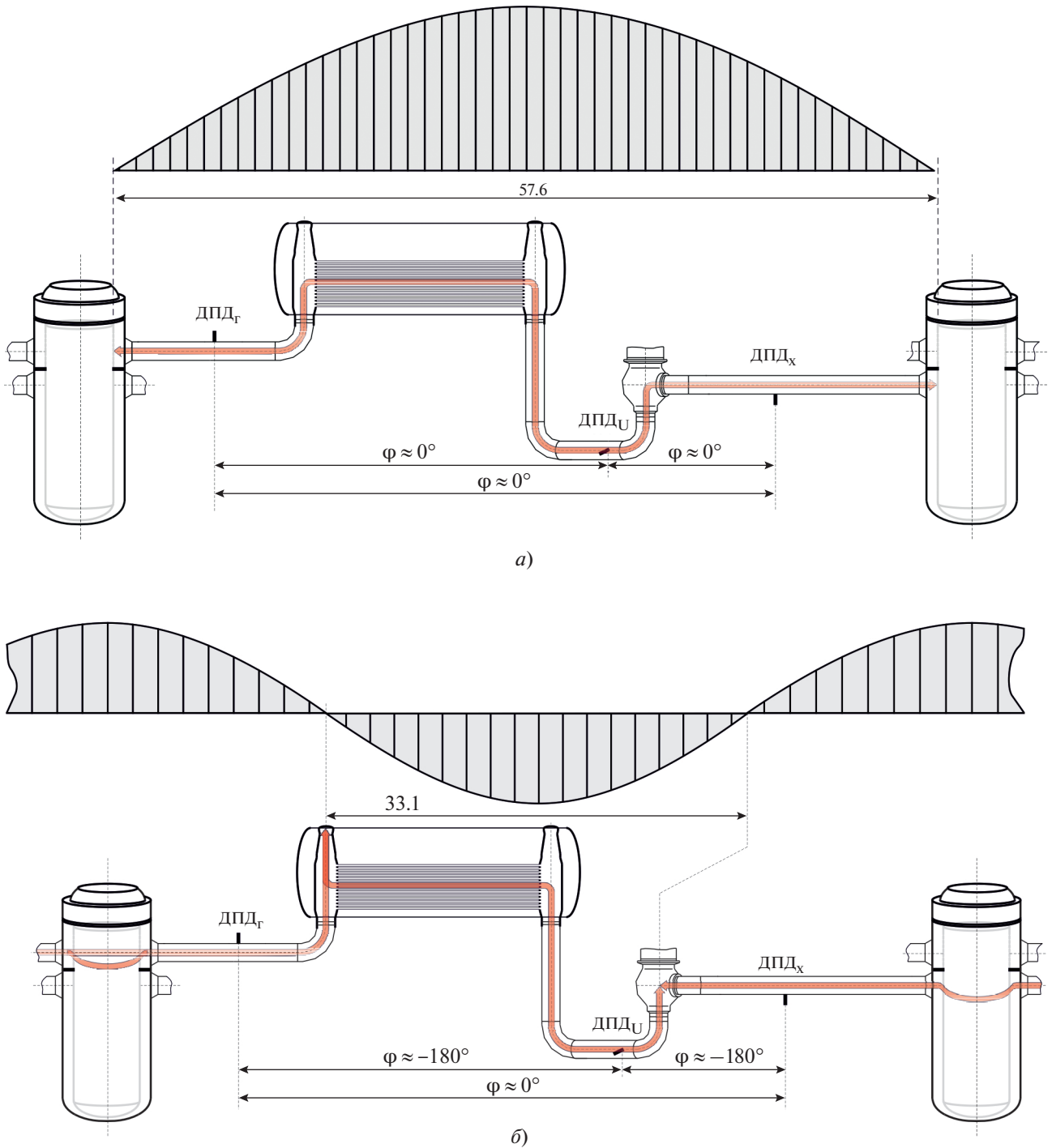
Нулевые фазы между сигналами любых датчиков петли являются диагностическим признаком АСВ, поэтому вывод о существовании полуволны АСВ<sub>1П</sub> в петле вполне допустим.

После отсчета длины полуволны АСВ<sub>1П</sub> по средней акустической траектории (усредненное расстояние между двумя узлами АСВ) было получено значение 57.6 м, используя которое, по известной центральной частоте АСВ можно вычислить скорость звука. В изотермическом режиме разогрева (расхолаживания) реактора каждой температуре теплоносителя будут сопоставлены свои скорость звука и частота АСВ<sub>1П</sub>.

#### ПЕРВАЯ КОРПУСНАЯ АСВ (АСВ<sub>1К</sub>)

Другой по важности акустической стоячей волной является первая корпусная АСВ, характеризующаяся нулевыми фазами для любых пар датчиков в четырех “горячих” трубопроводах (рис. 3, б).

Если судить по тому, что ее частота почти в 1.5 раза больше частоты АСВ<sub>1П</sub>, то пространственная полуволна АСВ<sub>1К</sub> будет практически в 1.5 раза короче длины петли. Длина полуволны АСВ<sub>1К</sub> для ВВЭР-1200, полученная по ее частоте, при скорости звука, рассчитанной по частоте и длине волны АСВ<sub>1П</sub>, будет равна 33.1 м. Если траекторию для АСВ<sub>1К</sub> исчислять от крышки одного “горячего” коллектора ПГ до крышки другого, противоположного, “горячего” коллектора ПГ, то расстояние также будет составлять 33.1 м. В результате полуволна АСВ<sub>1К</sub> укладывается от “горячего” коллектора одного ПГ до “горячего” коллектора противоположного ПГ, проходя путь через корпус реактора, т.е. полуволны АСВ<sub>1К</sub> распространяются от ПГ1 до ПГ3 и от ПГ2 до ПГ4.



**Рис. 3.** Распределение амплитуд  $\text{АСВ}_{\text{IП}}$  (а) и  $\text{АСВ}_{\text{IК}}$  (б) на развертке теплообменной петли ГЦК ВВЭР-1200 со значениями фаз  $\varphi$  в парах сигналов  $\text{ДПД}_\Gamma$ ,  $\text{ДПД}_\text{У}$ ,  $\text{ДПД}_\text{Х}$

Эту АСВ можно также представить в виде четырех четвертьволн из “горячих” трубопроводов каждой петли, которые объединяются в точках своих пучностей на вертикальной оси симметрии реактора в единую глобальную волну. Так как по всем “горячим” трубопроводам и в объеме актив-

ной зоны распространяется  $\text{АСВ}_{\text{IК}}$  одной и той же по знаку амплитуды, на нейтронный поток оказывается мощный барометрический эффект. Резонанс на частоте  $\text{АСВ}_{\text{IК}}$  является доминирующим и во внезонном, и во внутризонном нейтронном шуме [15].

Первая корпусная АСВ не относится к простым акустическим стоячим волнам – у нее есть и другие полуволны. Об этом свидетельствуют противофазы сигналов ДПД<sub>Г</sub> и ДПД<sub>У</sub> в любой петле при высоких значениях когерентностей на частоте АСВ<sub>1К</sub>. На расстоянии 33.1 м по средней акустической траектории от “горячего” коллектора ПГ расположен ГЦНА. На этой длине находится отрицательная полуволна АСВ<sub>1К</sub>. Продвигаясь далее по петле, можно обнаружить весьма слабые противофазные корреляции на частоте АСВ<sub>1К</sub> между сигналами ДПД<sub>У</sub> и ДПД<sub>Х</sub>. Возможно, причина тому – узел АСВ<sub>1К</sub>, находящийся на ГЦНА, и, как следствие, небольшие значения амплитуд АСВ<sub>1К</sub> слева и справа от узла вблизи координат датчиков ДПД<sub>У</sub> и ДПД<sub>Х</sub>. То есть от ГЦНА и далее по “холодному” трубопроводу в сторону корпуса реактора расположена следующая полуволна АСВ<sub>1К</sub>.

В отличие от положительной полуволны АСВ<sub>1К</sub>, покрывающей реактор вместе с “горячими” трубопроводами, другая положительная полуволна АСВ<sub>1К</sub> покрывает “холодные” трубопроводы, огибая внутрикорпусную шахту и проникая в соседние и противоположные петли. Расстояние между противоположными ГЦНА (между ГЦНА1 и ГЦНА3, между ГЦНА2 и ГЦНА4) также равно примерно 33.1 м. Эта положительная полуволна тоже объемная и проникает в корпус реактора, как и другая положительная полуволна, но не попадает в “пространство” активной зоны.

Таким образом, удалось замкнуть АСВ<sub>1К</sub> в единое глобальное акустическое поле с четырьмя узлами в четырех “горячих” коллекторах четырех ПГ, с четырьмя узлами в ГЦНА и с пучностями в “холодных” коллекторах ПГ и в корпусе РУ. В образовании АСВ<sub>1К</sub> задействованы все основные элементы ГЦК: ПГ, ГЦНА, корпус РУ. Они располагались так, что первоначальная простая АСВ в виде одной полуволны, покрывающей реактор, размножилась кратными расстояниями в замкнутое, в точности периодическое в пространстве акустическое поле АСВ<sub>1К</sub>, распространяющееся на весь ГЦК.

Наличие узла АСВ<sub>1К</sub> в “горячем” коллекторе ПГ, как и в ГЦНА, является неблагоприятным фактором вибронегрузки ПГ и ГЦНА со стороны теплоносителя. В узле акустической стоячей волны находится максимальный пространственный градиент акустического поля, от которого зависит размах вынужденных колебаний конструкции на частоте АСВ<sub>1К</sub>. Возможно, этим и объясняются выявленные в ходе вибрационных измерений [16] так называемые крутильные колебания ПГ вокруг “горячего” коллектора, которые вызывают повышенные эксплуатационные нагрузки на сварные соединения коллектора ПГ.

## ВТОРАЯ (АСВ<sub>2П</sub>) И ЧЕТВЕРТАЯ (АСВ<sub>4П</sub>) ПЕТЛЕВЫЕ АСВ

Исходя из свойств АСВ как волны, целесообразно рассмотреть наличие гармоник для АСВ<sub>1П</sub>.

Вводится обозначение АСВ<sub>2П</sub> для второй гармоники петлевой АСВ<sub>1П</sub>; далее о ней будет идти речь не как о второй гармонике АСВ<sub>1П</sub>, а как о второй петлевой АСВ. Узел АСВ<sub>2П</sub> находится практически точно на “холодном” коллекторе ПГ, что усиливает вибрационную нагрузку на данный узел. Это, возможно, является одной из причин сквозных трещин, возникающих в коллекторах ПГ (рис. 4, а). Следует отметить, что АСВ<sub>2П</sub> по амплитуде заметно меньше, чем АСВ<sub>1П</sub>.

В экспериментах на РУ с ВВЭР-1200 третья гармоника АСВ<sub>1П</sub> не была выявлена, в [3, 14, 15] указанный эффект был предсказан теоретически и обоснован.

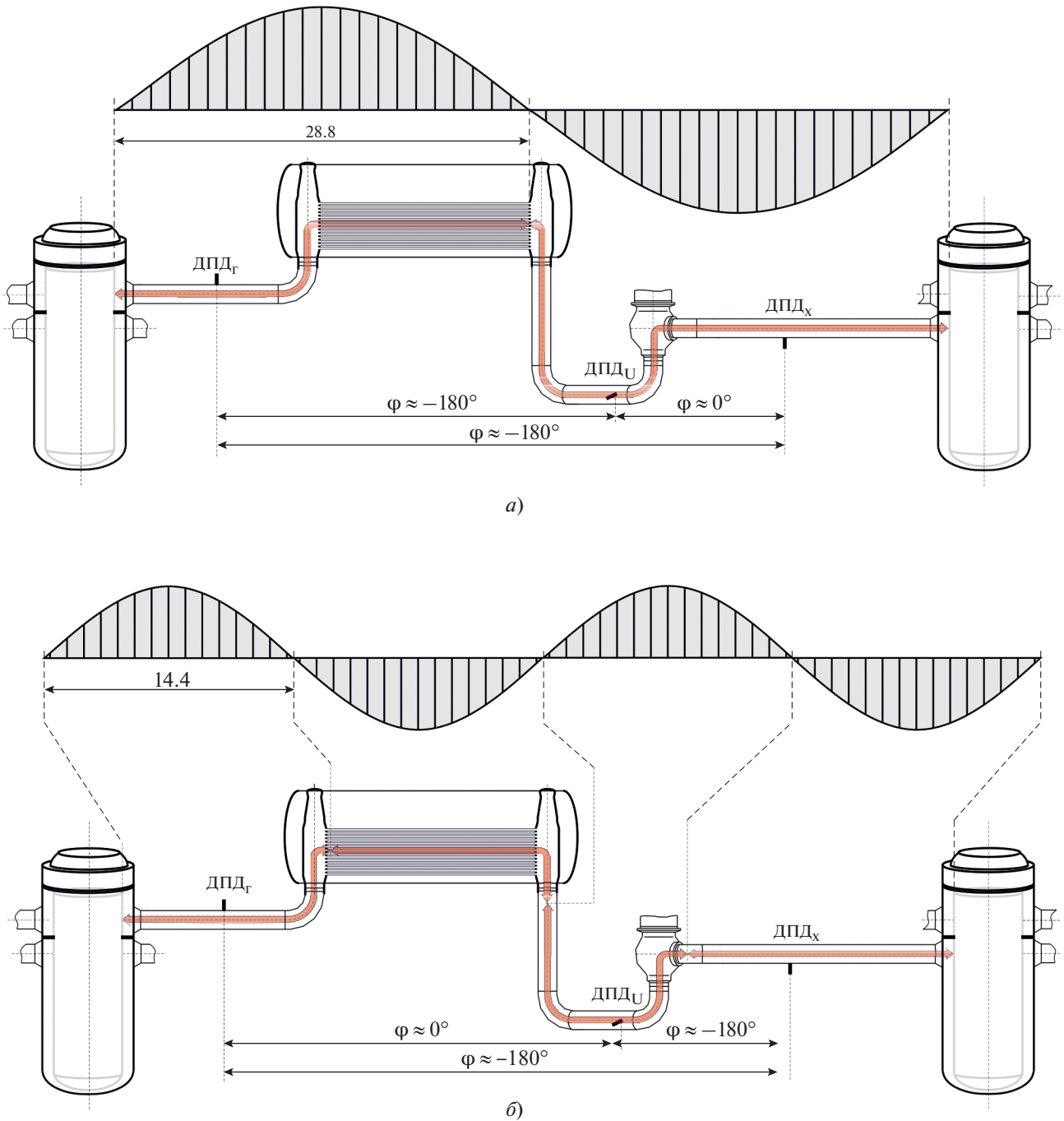
Логично идентифицировать четвертую гармонику АСВ<sub>1П</sub>, обозначив ее как АСВ<sub>4П</sub>. Эта гармоника будет указана как четвертая петлевая АСВ (рис. 4, б) – АСВ<sub>4П</sub>. Частота АСВ<sub>4П</sub> при минимально контролируемом уровне мощности приходится на диапазон 30–33 Гц.

Узел АСВ<sub>4П</sub> расположен поблизости от “горячего” коллектора ПГ, а амплитуда практически соизмерима с амплитудой АСВ<sub>1П</sub>. Это важный признак для ее изучения, поскольку появляется возможность возникновения различных резонансных явлений.

Далее будут представлены результаты, полученные авторами настоящей статьи при исследовании совпадения частоты АСВ<sub>4П</sub> и второй гармоники оборотной частоты ГЦНА (33.2 Гц). Резонансные явления при совпадении данных частот не только возможны, но и неоднократно наблюдались авторами при разогреве/расхолаживании энергоблока, так как скорость звука зависит от температуры теплоносителя, которая, в свою очередь, может изменяться в значительных пределах при штатных операциях. Собственно, это событие происходит всегда при некоторой промежуточной температуре теплоносителя при разогреве и расхолаживании энергоблока.

Такое совпадение чревато усилением колебаний на второй гармонике оборотной частоты ГЦНА и, как следствие, возможным гидроударом. Вероятен также и благоприятный эффект снижения вынужденных колебаний на частоте ГЦНА и ее гармониках.

Именно на таких в точности прогнозируемых совпадениях частот гармоник АСВ с гармониками оборотной частоты ГЦНА и должен прово-



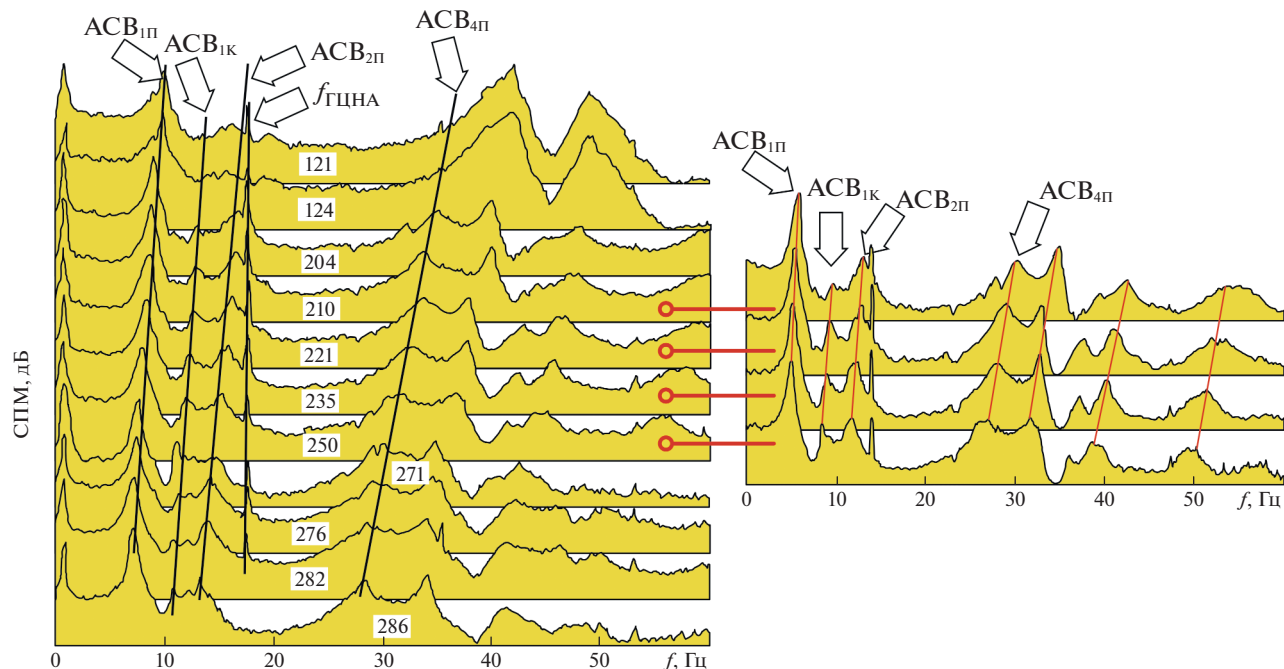
**Рис. 4.** Распределение амплитуд АСВ<sub>2П</sub> (а) и АСВ<sub>4П</sub> (б) на развертке теплообменной петли ГЦК ВВЭР-1200 со значениями фаз  $\varphi$  в парах сигналов ДПД<sub>Г</sub>, ДПД<sub>Х</sub>, ДПД<sub>У</sub>

даться анализ диссипативных свойств конструкции реакторной установки. На этой температуре теплоносителя может верифицироваться расчетный код вычисления полей АСВ<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> В статье описаны не все исследованные АСВ, более полную и детальную информацию о других типах АСВ можно найти в [3, 14].

#### ЛИНЕЙНЫЕ АППРОКСИМАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ АСВ ВВЭР-1200

В качестве примера будет рассмотрено семейство оценок спектральной плотности мощности (СПМ) сигналов ДПД<sub>Г1</sub> (датчик пульсации давления на “горячей” нитке петли 1), полученных при



**Рис. 5.** Некоторые СПМ сигналов датчика ДПДГ<sub>1</sub>, построенные в ходе эксперимента с монотонным увеличением температуры теплоносителя от 120 до 280 °С с одновременным маневрированием числом функционирующих ГЦНА (отдельно представлены оценки четырех СПМ от четырех функционирующих ГЦНА при изменении температуры теплоносителя: 210, 221, 235, 250 °С).

$f_{\text{ГЦНА}}$  — частота вращения вала ГЦНА

пусконаладочных испытаниях энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 с ВВЭР-1200 при изменении числа функционирующих ГЦНА с одновременным увеличением температуры теплоносителя. Из него будут выделены только четыре оценки СПМ, однородные по своим источникам (рис. 5). Они получены при работе всех четырех ГЦНА и монотонном изменении температуры теплоносителя с практически одинаковым шагом: 210, 221, 235, 250 °С.

Отличительная особенность этих четырех СПМ относительно всего семейства СПМ состоит в том, что по ним однозначно выделяются семь практически линейных температурных зависимостей. Эти зависимости однозначно относятся к семи типам АСВ. Если первые четыре (нижние) АСВ (АСВ<sub>1п</sub>, АСВ<sub>1к</sub>, АСВ<sub>2п</sub>, АСВ<sub>4п</sub>) уже интерпретированы, то остальные (высшие) АСВ (локальные АСВ<sub>лок1</sub> и АСВ<sub>лок2</sub>, АСВ<sub>6п</sub>) подлежат уточнению (некоторые проблемы интерпретации данных волн описаны в [17, 18]).

На рис. 6 приведены линейные аппроксимации семи температурных зависимостей частот АСВ. Там же показаны точки совпадения некоторой частоты АСВ и трех первых гармоник оборотной частоты ГЦНА. Таким образом, удалось установить семь точек пересечения (и это только по

низшим типам АСВ и гармоникам ГЦНА), т.е. совпадения частот вынуждающих сил (гармоник оборотных частот ГЦНА) и собственных частот колебаний теплоносителя (частот АСВ). Это свидетельствует о наступлении резонансных возбуждений, возникающих регулярно и многократно при разогреве/расхолаживании энергоблока в диапазоне рабочих температур теплоносителя без каких-либо заметных изменений вибрационных характеристик, регистрируемых проектными средствами.

Прямолинейные аналитические зависимости (см. рис. 6 и данные таблицы) получены методом наименьших квадратов по резонансам выбранных СПМ. Угол наклона прямых с увеличением номера АСВ (или начальной частоты АСВ) изменяется монотонно в соответствии с зависимостями (см. таблицу): с ростом начальной частоты акустических стоячих волн растут по модулю и коэффициенты прямолинейных зависимостей. Для первых (низших) типов АСВ<sub>1п</sub> и АСВ<sub>1к</sub> (см. таблицу) наблюдаются практические совпадения с зависимостями для ВВЭР-1000.

В таблице экстраполированные вверх и вниз частоты АСВ хорошо совпадают с экспериментальными значениями соответствующих частот, полученными при температурах 40 и 290 °С, что также свидетельствует об удовлетворительном

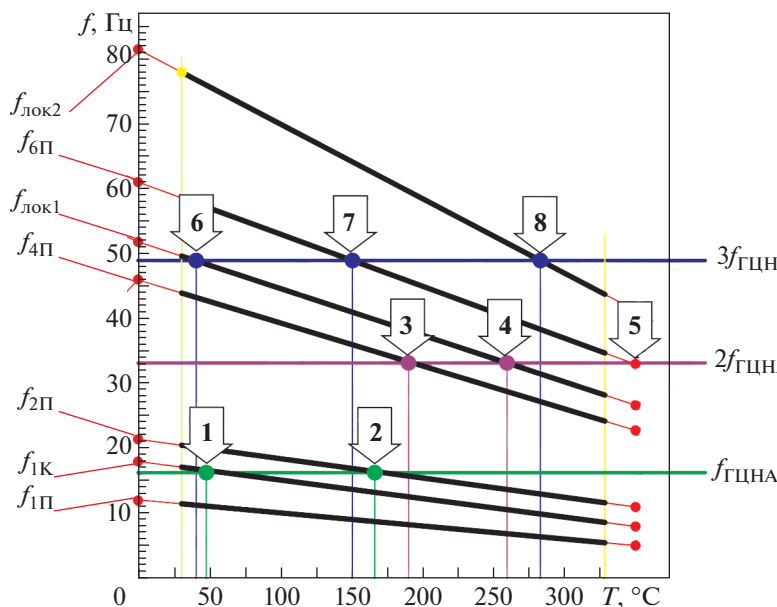


Рис. 6. Изменение центральных частот различных АСВ в зависимости от температуры теплоносителя I контура. Цифрами от 1 до 8 обозначены критические точки совпадения частот

качестве линейных температурных приближений. При проведении экспериментов не раз отмечался факт некратного соответствия частот гармоник АСВ, предположительно из-за ненулевого диаметра трубопровода. Этот результат также подтверждается данными таблицы и экспериментальными аппроксимациями, полученными по методу наименьших квадратов. Например, отношение  $f_{2П}/f_{1П}$  не равно в точности 2, а, как следует из таблицы,  $f_{2П}/f_{1П} = 1.85$  и  $f_{4П}/f_{2П} = 1.90$ . С увеличением номера гармоники АСВ или числа

узлов и пучностей АСВ возрастает континуум возможных акустических путей и все более широкими становятся резонансы АСВ с возможным сдвигом центральной частоты АСВ (подробнее о расчете путей прохождения прямой и обратных волн указано в монографии [3]).

#### РЕЗОНАНСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПРИ СОВМЕЩЕНИИ ГАРМОНИК ГЦНА И АСВ

Вариативность температуры теплоносителя, особенно при штатных режимах разогрева/рас-

Экспериментальные температурные зависимости параметров семи АСВ

Центральная частота АСВ $f(T) = f(T_0)(1 + \alpha_c T_0) - f(T_0)\alpha_c T$	Температурный коэффициент $\alpha_c$	Экстраполированная центральная частота АСВ, Гц, для температуры	
		290°C	40°C
$f_{1П} = 12.31 - 1.80 \times 10^{-2}T$	1.42	7.1	11.6
$f_{1К} = 16.80 - 2.36 \times 10^{-2}T$	1.40	9.9	15.9
$f_{2П} = 22.73 - 3.17 \times 10^{-2}T$	1.40	13.5	21.5
$f_{4П} = 43.30 - 5.93 \times 10^{-2}T$	1.40	26.1	40.9
$f_{лок1} = 51.82 - 6.98 \times 10^{-2}T$	1.38	50.3	77.2
$f_{6П} = 61.20 - 7.96 \times 10^{-2}T$	1.36	38.1	58.0
$f_{лок2} = 81.30 - 105.69 \times 10^{-2}T$	1.36	31.6	49.0

Примечание.  $f(T)$  — зависимость центральной частоты АСВ от температуры теплоносителя  $T$ ;  $T_0$  — начальная температура теплоносителя (40°C); частота:  $f_{1П}$  — АСВ<sub>1П</sub>;  $f_{1К}$  — АСВ<sub>1К</sub>;  $f_{2П}$  — АСВ<sub>2П</sub>;  $f_{4П}$  — АСВ<sub>4П</sub>;  $f_{лок1}$  — АСВ<sub>лок1</sub>;  $f_{6П}$  — АСВ<sub>6П</sub>;  $f_{лок2}$  — АСВ<sub>лок2</sub>.

холаживания энергоблока, обуславливает изменение скорости звука в теплоносителе и, как следствие, смещение центральных частот АСВ. В общем случае можно руководствоваться правилом, что повышение температуры теплоносителя приводит к дрейфу центральной частоты АСВ, Гц, к нулю. На рис. 5 в качестве примера показаны направления изменения частот основных АСВ для РУ с ВВЭР-1200 в диапазоне температур от 121 до 286°C. Как можно заметить, в процесс вовлечены абсолютно все АСВ, при этом каждая отдельная акустическая стоячая волна имеет свою, присущую только ей, скорость миграции, Гц/град, по оси частот.

По этой причине при разогреве энергоблока в диапазоне условно от 50 до 300°C неизбежно возникает эффект совпадения гармоник оборотной частоты ГЦНА (основной источник генерации механических колебаний) с центральной частотой некоторых АСВ (или их гармоник). Особенно это актуально для энергоблока, работающего на 100%-ном уровне мощности, когда очень важно избегать любых резонансных возбуждений, вызываемых совпадением различных частот функционирующего оборудования, но при переходных режимах такие совпадения неизбежны (подробнее в [3, 14]).

При полном разогреве РУ с ВВЭР-1200 с некоторыми допущениями было выделено около восьми режимов, способных привести к резонансным явлениям на энергоблоке (см. рис. 6), когда происходит наложение оборотной частоты ГЦНА  $f_{об} = 16.6$  Гц или ее гармоник  $n \times f_{об}$  ( $n = 1, 2, 3...$ ) с центральными частотами АСВ.

В ходе экспериментальной работы были достоверно определены два режима резонансного возбуждения при достижении температурой теплоносителя значений приблизительно 170°C (АСВ<sub>2п</sub>) (режим 2) и 190°C (АСВ<sub>4п</sub>) (режим 3).

Указанные режимы резонансного возбуждения не приняты во внимание ни главным конструктором, ни главным проектировщиком для оценки ресурсных характеристик и, соответственно, не отражены в эксплуатационной документации как режимы, требующие минимального времени прохождения.

Обнаружение неучтенных и ранее неизвестных эффектов резонансного возбуждения является доказательством необходимости проведения экспериментальных работ по шумовому анализу сигналов, так как никакие расчетные методы и средства компьютерной имитации не позволят адекватно смоделировать технологические процессы, происходящие в реакторной установке.

## ВЫВОДЫ

1. На основании полученных экспериментальных данных построена модель поля АСВ

ВВЭР-1200 с описанием характеристик – центральных частот и длин полуволн, введена классификация и разработаны условные обозначения. Определены места формирования узлов и пучностей для всех основных АСВ в пределах ГЦК РУ с ВВЭР-1200. Для зависимостей изменения центральной частоты АСВ от температуры теплоносителя выведены аналитические уравнения.

2. При совпадении частот различных АСВ с частотой вращения ГЦНА или ее гармониками наблюдаются режимы резонансного возбуждения ГЦК.

3. Из данных, полученных в процессе экспериментов, следует главный вывод: АСВ являются основным источником вибрации оборудования ГЦК и ее негативного воздействия на его ресурс.

4. Первостепенное условие для возникновения АСВ – наличие препятствий на пути бегущих волн, вызывающих эффект отражения. Акустическая стоячая волна никогда не появляется, если в тракте распространения пульсаций нет препятствий или поверхность на пути потока обладает абсолютными поглощающими свойствами. Различных поверхностей, составляющих препятствия потоку, в ГЦК ВВЭР не так много, и все они обуславливают образование АСВ<sub>1п</sub>, АСВ<sub>1к</sub> и их гармоник.

5. В настоящей работе не изложен вопрос влияния дополнительных трубопроводов на систему стоячих и бегущих волн, существенно изменяющего изложенную картину, так как в ходе экспериментов было выявлено значительное воздействие этих трубопроводов на акустику как отдельной теплообменной петли, так и всего ГЦК. Будучи элементами I контура, такие трубопроводы сами нуждаются в анализе и уточнении собственных акустических свойств. Отсюда следует неизбежный вывод о том, что вибросостояние дополнительных трубопроводов определяется собственными АСВ, а они, в свою очередь, зависят от длины трубопровода и состояния среды, что также требует специальных исследований.

6. Каждая теплообменная петля уникальна по составу дополнительных трубопроводов, что делает картину АСВ неповторимой по петлям. Некоторые дополнительные трубопроводы находятся в составе контуров регулирования параметров РУ ввиду открытия/закрытия соответствующей арматуры. При этом, очевидно, дискретно варьируются частоты АСВ дополнительных трубопроводов, изменяя их вибросостояние.

7. Также в качестве довольно длинных отрезков большого диаметра необходимо рассматривать трубопроводы пассивной части системы автоматического охлаждения активной зоны, присоединенные к корпусу РУ и предназначенные для соединения емкостей, входящих

в эту систему, с реактором. Длины трубопроводов данной системы резко увеличатся в результате открытия запорных арматур в случае аварии. Необходимо обоснование того, что такое акустическое воздействие не вызовет аномальных резонансных ответов со стороны контура циркуляции. Перечисленные проблемы акустических эффектов дополнительных трубопроводов требуют особых и кропотливых исследований, которые выходят за рамки настоящей работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вибросостояние** корпуса и внутрикорпусных устройств реакторной установки ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, В.П. Поваров, М.Т. Слепов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1 (136). С. 54–67. [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2022\\_1\\_54](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_54)
- Оценка** вибраций ГЦНА при совместном использовании диагностических систем / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, В.П. Поваров, М.Т. Слепов // Новое в российской электроэнергетике. 2022. № 6. С. 33–40.
- Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т.** Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200: монография. М.: Наука, 2018.
- Проскуряков К.Н.** Виброакустическая паспортизация АЭС – средство повышения их надежности и безопасности // Теплоэнергетика. 2005. № 12. С. 30–34.
- Проскуряков К.Н., Федоров А.И., Запорожец М.В.** Прогнозирование условий возникновения в первых контурах АЭС с ВВЭР виброакустических резонансов с внешними периодическими нагрузками // Теплоэнергетика. 2015. № 8. С. 17–23. <https://doi.org/10.1134/S0040363615080068>
- Proskuryakov K.N.** Scientific basis for modeling and calculation of acoustic vibrations in the nuclear power plant coolant // Proc. of the Intern. Conf. “Problems of Thermal Physics and Power Engineering” (PTPPE-2017). Moscow, Russia, 9–11 Oct. 2017 // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. P. 012182. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012182>
- Проскуряков К.Н., Новиков К.С.** Область резонансного взаимодействия вибраций внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000 и пульсаций давления при закритических параметрах // 6-я междунар. науч.-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. Подольск, Россия, ОКБ “Гидропресс”, 26–29 мая 2009 г. С. 42–46.
- Проскуряков К.Н., Новиков К.С.** Определение области виброакустических резонансов теплоносителя и ТВС в перспективных реакторах повышенной мощности // Атомная энергия. 2010. Т. 108. Вып. 3. С. 151–154.
- Проскуряков К.Н.** Создание и верификация акустической модели ядерного реактора // Научно-технологии. 2019. Т. 20. № 4. С. 62–69. <https://doi.org/10.18127/j.19998465-201904-07>
- Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Afshar E.** Computer modeling of acoustic standing waves in the coolant of nuclear power plants // Proc. of the 15th Intern. Conf. on Optical Methods of Flow Investigation. Moscow, Russia, 24–28 June 2019 // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1421. P. 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1421/1/012041>
- Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Afshar E.** Verification of digital models of coolant self-oscillation of NPP with VVER // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1683: Actual issues of thermal power engineering and thermal engineering. P. 042076. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042076>
- Proskuryakov K.N., Anikeev A.V.** Development and verification of methods for predicting the frequency of self-oscillations in swirling coolant flows of nuclear power plants. // Proc. of the VIII Intern. Conf. “Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flows” (HMTHSF 2021). Moscow, Russia, 18–21 Oct. 2021 // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2088. P. 012037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2088/1/012037>
- Овчинников В.Ф., Смирнов Л.В.** Колебания трубопроводов с нестационарным потоком жидкости // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. 1985. № 2. С. 3–11.
- Феноменология** акустических стоячих волн применительно к реакторной установке ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, В.П. Поваров, М.Т. Слепов // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2021. № 4. С. 110–121. <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.10>
- Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т.** Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. М.: Наука, 2021.
- Хайретдинов В.У.** Разработка методики контроля вибродинамической нагруженности внутриреакторного оборудования ВВЭР-1000: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007.
- Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т.** Виброакустика ВВЭР-1200 // Сб. трудов XI Междунар. науч.-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. Подольск, Россия, ОКБ “Гидропресс”. 21–24 мая 2019 г. <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/documents/mntk2019-061.pdf>
- Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У.** Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200 // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2016. № 4. С. 44–54. <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>

## The Field of Acoustic Standing Waves in the VVER Reactor Coolant Circuits

G. V. Arkadov<sup>a, \*</sup> and M. T. Slepov<sup>b, \*\*</sup>

<sup>a</sup> Noncommercial Partnership RISE for Fostering the Development of System Engineering, Moscow, 111141 Russia

<sup>b</sup> Novovoronezh NPP, Branch of Rosenergoatom Joint-Stock Company, Novovoronezh, 396071 Russia

\*e-mail: arkgen47@gmail.com

\*\*e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

**Abstract**—Many research teams and groups pay much attention to matters concerned with hydrodynamic impacts exerted on the equipment of nuclear power facilities (NPFs), which is reflected in numerous publications: monographs, articles, and reviews. However, despite the availability of theoretical works on this problem, matters concerned with applied investigations, i.e., immediately with direct measurements, still remain beyond the scope of scientific interests of Russian and foreign scientists. The need of studying them for practical applications is mainly stemming from the complexity of interpreting various revealed abnormalities, requirements for precise adjustment of various models, and essentially different spectral images of equipment not only within the framework of various designs of reactor plants (RPs), but in the power units of the same type within one NPP. These problems cannot be solved using solely theoretical or calculation methods, or using simulation software tools. The situation is also aggravated by the fact that the process of carrying out investigations is an exceptionally complex problem in terms of both selecting the data sources and interpreting the information obtained. In all likelihood, it is exactly these factors due to which an essentially weakened interest in experimental works on vibroacoustic topic in various RPs both in Russia and other countries can be explained. The article briefly presents some results of studying the fields of acoustic standing waves (ASWs) in the reactor coolant circuit (RCC) of a reactor plant equipped with a pressurized water reactor (VVER-1200) taking as an example power unit 1 at the Novovoronezh-2 NPP; in addition, the main ASW types are described.

**Keywords:** acoustic standing wave, reactor coolant circuit, reactor coolant pump set, VVER-1200, nuclear reactor digital acoustic model, vibration, pressure pulsation sensor