

## ИСПЫТАНИЯ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИИ АДФ

Ю.В. Егоров, В.В. Макаров, В.Н. Ульяновский, А.В. Афанасьев, И.В. Матвиенко  
АО «ОКБ ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, makarov@grpress.podolsk.ru

### Аннотация

В настоящее время по данным послереакторных исследований ТВС ВВЭР-1000 основной причиной разгерметизации твэлов являются повреждения твэлов, вызванные посторонними предметами (дебрис-частицами). Для предотвращения попадания посторонних предметов в пучок твэлов применяются антидебрисные фильтры (АДФ), устанавливаемые в хвостовиках ТВС. В настоящее время опытную эксплуатацию в реакторах ВВЭР-1000 проходит ряд ТВС, оснащенных АДФ первого поколения, и ведется разработка конструкции АДФ имеющих лучшую по сравнению с АДФ первого поколения фильтрующую способность.

В докладе представлены результаты испытаний трех различных конструкций АДФ. Были проведены следующие испытания:

- гидравлические;
- определение фильтрующей способности;
- определение влияния на вибрацию нижних пролетов твэлов;
- ресурсные.

*Ключевые слова:* ВВЭР, ТВС, АДФ, износ, дебрис.

### Введение

Дебрис-частицы – посторонние предметы, попавшие в реакторный контур во время монтажных работ, технологических операций в ходе ППР а также в случае разрушения элементов ТВС или оборудования первого контура. Попадание дебриса в контакт с оболочкой твэла может привести к её разрушению и выходу продуктов распада в первый контур охлаждения реактора. Исследования шести негерметичных кассет реактора ВВЭР-1000 на стендах НИИАР в 2006-2015 годах показали, что причиной отказа пяти из них был дебрис [1]. Статистика отказов твэлов для реакторов типа PWR [2] представлена на рисунке 1 Доля отказов по причине дебриса ТВС реакторов PWR стоит на втором месте после фреттинг-коррозии. В настоящее время принята стратегия «нулевого отказа» и одним из направлений работ в рамках данной стратегии является повышение эффективности антидебрисных фильтров, установленных в ТВС.

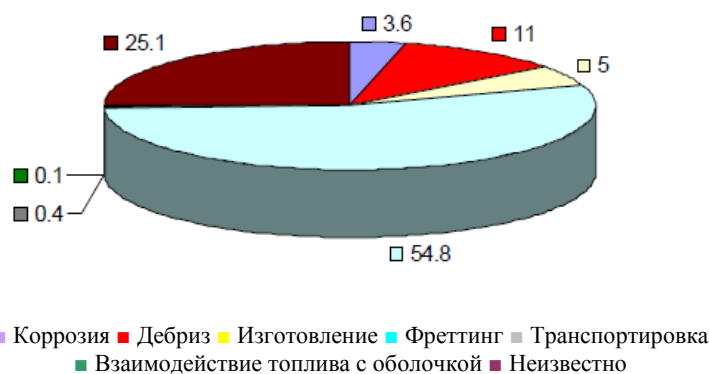


Рисунок 1 – Причины отказов топлива в реакторах PWR

антидебрисных фильтров, установленных в ТВС.

В докладе представлена методика испытаний трех различных перспективных конструкций АДФ – двух вариантов лабиринтного фильтра и сетчатого фильтра.

Целью испытаний было определение КГС, эффективности фильтрующей способности хвостовиков с АДФ, исследование влияния установки АДФ на уровень вибрации твэлов в нижних пролетах ТВС и подтверждение ресурсных характеристик АДФ.

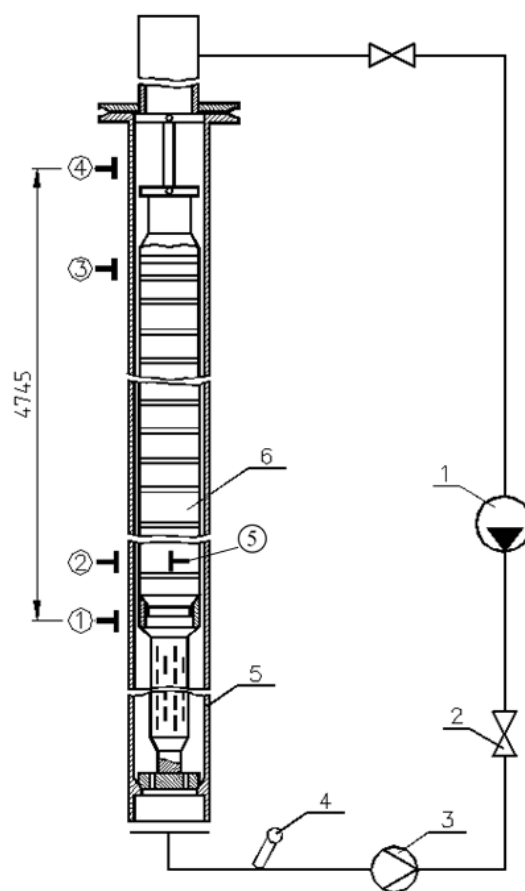
## Гидравлические испытания

Определение КГС хвостовиков с АДФ различной конструкции, проводилось на стенде массового пролива кассет (рисунок 2). Стенд имеет замкнутый циркуляционный контур и заполняется химически обессоленной водой.

Перепады давления на макете ТВС и его элементах измерялись с помощью четырех отборов статического давления на корпусе колонки и отбора статического давления зонда в пучке твэлов макета. Отбор давления №1 располагался в опорной трубе (на центральной оси трубы) на расстоянии 75 мм ниже торца хвостовика макета. Отбор давления №2 располагался между нижней опорной решеткой и ДР1, на расстоянии 50 мм от нижней опорной решетки. На таком же расстоянии от нижней опорной решетки в центре пучка твэлов макета был расположен отбор зонда №5, устанавливаемого в макет через крышку колонки. Отбор давления №3 располагался на расстоянии 3720 мм от отбора давления №2. Верхний отбор давления №4 располагался в выходной камере колонки в районе крестовины над головкой макета ТВС.

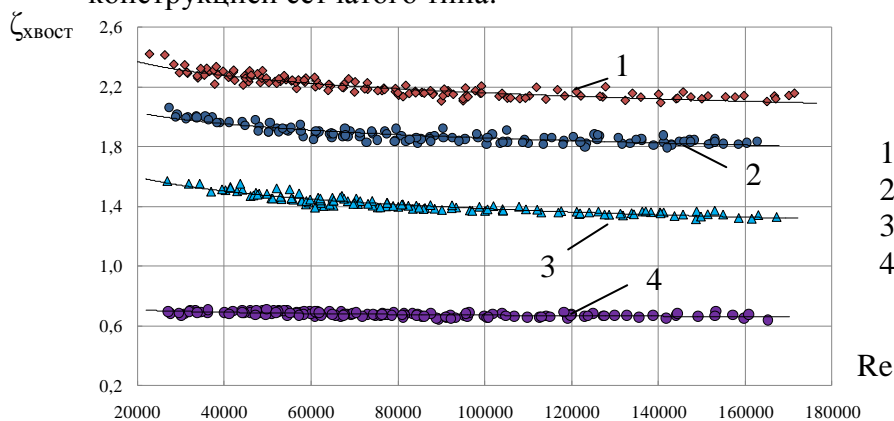
Для определения величин КГС макет ТВС с каждым из трех испытываемых вариантов конструкции АДФ поочередно устанавливался в колонку стенда. Перед испытаниями макета с АДФ в хвостовиках на стенде было проведено определение КГС макета ТВС без АДФ.

КГС хвостовиков с различными вариантами конструкции АДФ приведены на рисунке 3, из которого видно, что наименьшим сопротивлением обладает хвостовик с антидебрисным фильтром конструкции лабиринтного типа, наибольшим с конструкцией сетчатого типа.



- 1 – циркуляционный насос; 2 – задвижки;  
3 – электромагнитный расходомер;  
4 – термоэлектрический преобразователь;  
5 – колонка; 6 – макет ТВС;  
① - ⑤ – отборы давления

Рисунок 2 – Схема стенда массового пролива



- 1 – сетчатый  
2 – лабиринтный (тип 1)  
3 – лабиринтный (тип 2)  
4 – без АДФ

Рисунок 3 – Зависимости КГС хвостовиков макета ТВС с вариантами конструкции АДФ от числа Рейнольдса

## Испытания по определению фильтрующей способности

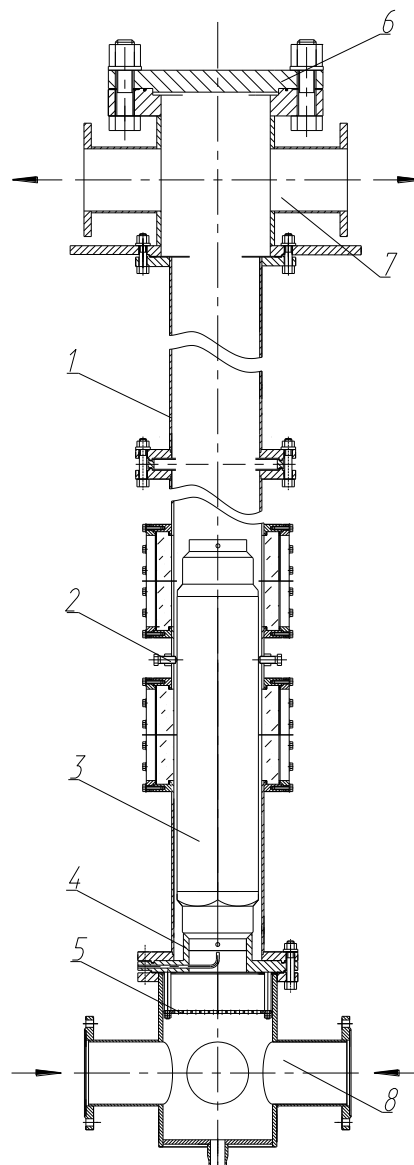
Испытания АДФ проводились в гидравлическом контуре стенда сейсмических и вибрационных испытаний ТВС. Гидравлическая система предназначена для создания потока воды через ТВС с расходом, близким к натурному, и включает в себя гидравлический тракт (трубопроводы, колонку, коллекторы), циркуляционный, подпиточный насосы и теплообменник. Основные гидравлические параметры стенда:

- температура воды – до 80 °С;
- расход теплоносителя через колонку – до 1200 м<sup>3</sup>/ч;
- давление в гидравлическом контуре – до 1 МПа.

В испытаниях поддерживались параметры расхода воды через хвостовик от 500 до 550 м<sup>3</sup>/ч и температуры от 50 до 60 °С. Испытания каждого АДФ проходили 120 минут, с остановками каждые 30 минут, на которых производилось отключение циркуляционного насоса стенда.

Перед началом испытаний в нижней части опорного стакана колонки стенда (рисунок 4, поз. 4) устанавливался сетчатый фильтр (поз. 5), на который помещались дебрис-частицы. Номенклатура дебриса приведена в таблице 2.1. На выходных трубопроводах (поз. 7) устанавливались сетчатые фильтры для улавливания прошедших через АДФ частиц. Затем оснастка для испытаний АДФ (поз. 3) устанавливалась в колонку стенда, крепилась к стенкам колонки от всплытия с помощью упоров (поз. 2), после чего проводилось заполнение контура водой и выход на рабочие параметры

Оснастка для испытаний АДФ представляла собой шестигранную трубу (рисунок 5), с двух концов которой устанавливались и закреплялись при помощи сварки хвостовики с АДФ. Направление движения теплоносителя через оснастку – снизу вверх. Первый по направлению потока хвостовик содержал испытываемую конструкцию АДФ, второй хвостовик устанавливался по отношению к направлению потока не штатно и служил для задержания дебриса, прошедшего через испытываемый АДФ.



- 1 – корпус колонки; 2 – упор;
- 3 – испытательная оснастка;
- 4 – опорный стакан;
- 5 – сетчатый фильтр;
- 6 – крышка; 7 – выходной трубопровод; 8 – входной трубопровод

Рисунок 4 – Схема стенда



Рисунок 5 – Оснастка для испытаний АДФ

Перед началом испытаний в нижней части колонки стенда устанавливался сетчатый фильтр, на который помещались дебрис-частицы. Номенклатура дебриса приведена в таблице 1, общий вид представлен на рисунке 8.

Таблица 1 – Номенклатура загруженного дебриса

Тип	Геометрия	L, мм	D, мм	H, мм	Кол-во, шт.	Материал
1		10	1,5		10	Сталь, медь
2		10	1,3		20	
3		20	1,5		10	
4		20	1,8		10	
5		20	2,5		10	
6		9	1,5		30	
7		15	1,5	6	5	
8		20	1,5	8	5	
9		15	1,5	6	5	
10		20	1,5	8	5	





Рисунок 8 – Общий вид загруженного дебриса

По окончании испытаний каждой конструкции АДФ определялось количество и тип задержанного, отраженного и пропущенного дебриса. Под отраженным дебрисом понимаются частицы, не застрявшие в АДФ и находившиеся на сетчатом фильтре опорного стакана после извлечения оснастки с испытываемым АДФ. Под задержанным дебрисом понимаются частицы, застрявшие в АДФ, для извлечения которых требуется приложение усилий, а также выпавшие из АДФ под собственным весом при извлечении оснастки из колонки стенда и демонтаже хвостовика из оснастки. Под дебрисом, пропущенным испытываемым АДФ, понимаются частицы, задержанные или отраженные фильтрами в контуре стенда.

Всего в результате испытаний лабиринтный АДФ (тип 1) задержал 71 частицу из 110, из которых 17 выпали при операциях с хвостовиком (при извлечении оснастки из колонки, демонтаже хвостовика). 31 частица была пропущена, 8 частиц было отражено.

В результате испытаний лабиринтного АДФ (тип 2) была пропущена только одна частица, диаметр которой превышает максимальный проектный зазор между пластинами АДФ. Данный факт может объясняться неточностями при изготовлении АДФ. Следует отметить низкое усилие фиксации задержанных частиц в фильтре – 37% частиц было отражено и 8% выпало при технологических операциях с фильтром.

Сетчатый АДФ задержал все 110 частиц.

В таблице 2 приведены доли задержанного, отраженного и пропущенного дебриса для каждой из испытанных конструкций АДФ-2.

Таблица 2 - Доля дебриса, задержанного, отраженного и пропущенного испытанными АДФ-2

Тип АДФ	Доля дебриса, %		
	Задержанный	Отраженный	Пропущенный
Лабиринтный (тип 1)	65	7	28
Лабиринтный (тип 2)	62	37	1
Сетчатый	100	0	0

## Определение влияния на вибрацию нижних пролетов твэлов

Внедрение АДФ в конструкцию ТВС может вызвать увеличение гидродинамических нагрузок на нижнюю часть твэлов, что, в свою очередь, может привести к усилению их вибрации. Возможными источниками дополнительных гидродинамических нагрузок на твэлы могут являться как сам АДФ, вызывающий, например, отклонение потока в поперечном направлении, так и поперечные перетечки между ТВС в переходных зонах вследствие различных гидравлических сопротивлений хвостовиков ТВС без АДФ и ТВС с АДФ. В связи с этим требует обоснования вибропрочность твэлов по условию отсутствия фреттинг-износа. Для решения этой задачи необходимо исследовать влияние упомянутых выше механизмов на уровень вибрации твэлов.

Для оценки влияния АДФ на вибрацию твэлов проводятся измерения вибрации нижней части твэлов при установленном АДФ и без него. Если АДФ не вызывает повышения уровня вибрации твэлов, то вибропрочность твэлов обосновывается на основании их успешной эксплуатации в работающих реакторах. Если введение АДФ приводит к увеличению уровня вибрации твэлов, то заключение о вибропрочности твэлов делается на основании сопоставления измеренного уровня вибрации твэлов при установленном АДФ с предельно допустимыми уровнями, определенными в результате испытаний на фреттинг-износ моделей нижней части ТВС.

Оценка влияния проводилась для лабиринтного АДФ (тип 2) и сетчатого АДФ. Исследования проводились в следующей последовательности:

- измерения вибрации твэлов в отсутствие АДФ;
- измерения вибрации твэлов при установленном АДФ сетчатого типа ;
- измерения вибрации твэлов при установленном АДФ лабиринтного типа (тип 2).

Вибрационные испытания макета ТВС проводились на стенде сейсмических и вибрационных испытаний ТВС при следующих параметрах теплоносителя – расход через ТВС  $(530 \pm 20)$  м<sup>3</sup>/ч., температурный диапазон от 20 до 50 °С. Исследовались пролеты твэлов между НР-ДР1, ДР1-ДР2 и ДР2-ДР3. Уровень вибрации колонки стенда контролировался при помощи пьезоэлектрического акселерометра, установленного в нижней части колонки. Вибрационный отклик твэлов измерялся при помощи четырех бесконтактных лазерных виброметров через смотровые окна колонки. Одновременно измерялись две компоненты вибрации двух твэлов (рисунок 9), расположенных на противоположных гранях ТВС.

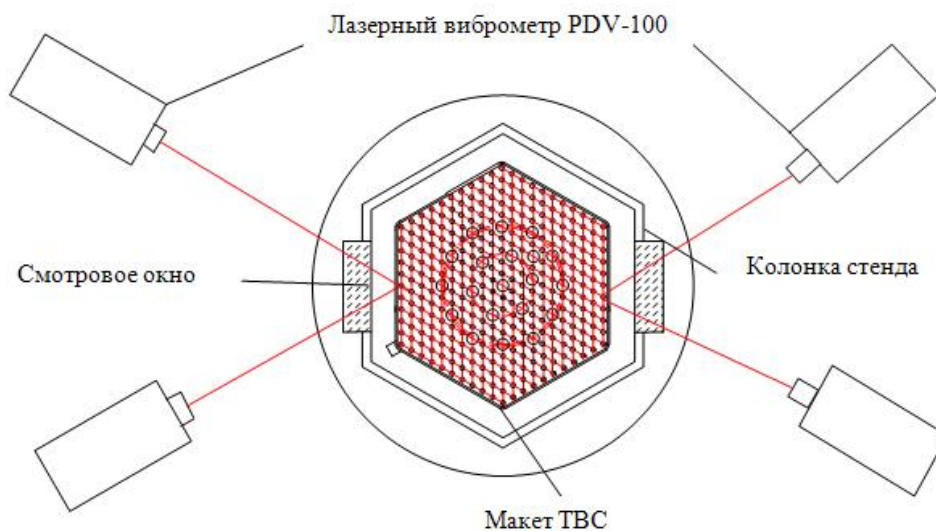


Рисунок 9 - Схема измерения двухкомпонентной вибрации твэлов (вид сверху)

Следует отметить, что при измерениях вибрации твэлов с помощью лазерных виброметров доля некорректных измерений составляет порядка 20-30 %. Критерием, по которому отсеиваются некачественные измерения, является наличие в спектре колебаний собственных частот твэла. Поскольку собственные частоты твэла в пролете НР-ДР1 проявляются слабо и находятся за пределами исследуемого диапазона измерений, перед испытаниями по четыре твэла на каждой грани были извлечены и НР - подняты вверх на расстояние около 25 мм до образования зазора между нижней заглушкой и НР, что привело к снижению собственных частот до 200-300 Гц и позволило точнее идентифицировать некачественные измерения.

Извлечение из НР также повысило восприимчивость твэлов к гидродинамическому возбуждению. Это позволило качественно определить влияние АДФ на вибрацию твэлов.

Усредненные СКЗ скоростей для массивов твэлов, а также их отношения приведены в таблице 3 и рисунке 10.

Таблица 3 – Средние значения СКЗ скоростей

Пролет	Длина, мм	Перемещение, мм/с Лабиринтный АДФ/ без АДФ	Отношение перемещений	Перемещение, мм/с Сетчатый АДФ/ без АДФ	Отношение перемещений
НР-ДР1	100	5,26/6,65	0,79	5,52/6,65	0,83
ДР1-ДР2	250	4,33/5,01	0,86	4,31/5,01	0,86
ДР2-ДР3	340	2,94/3,31	0,89	2,40/3,31	0,72

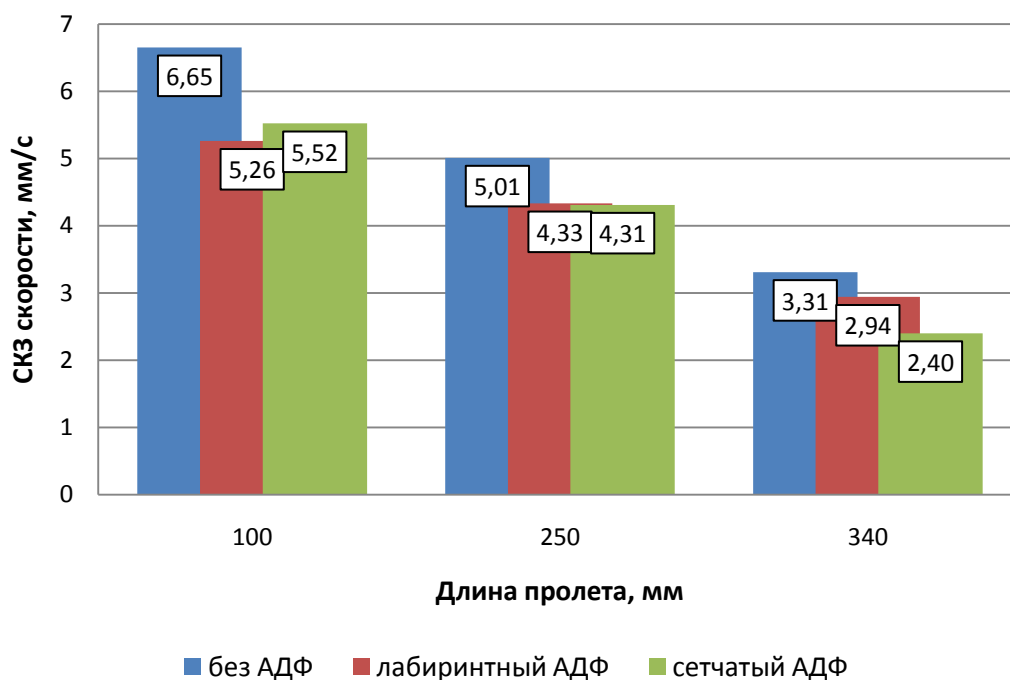


Рисунок 10 - Средние по пролетам СКЗ скоростей

## Ресурсные испытания

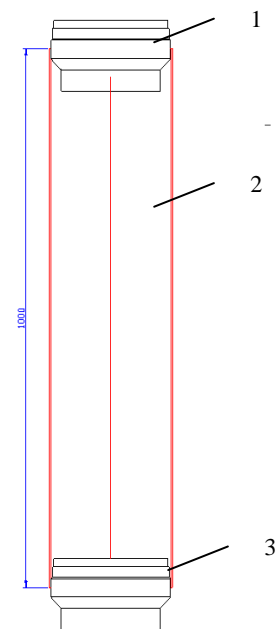
В натуральных условиях основными нагрузками, воздействующими на АДФ являются гидродинамические нагрузки со стороны теплоносителя. Поэтому в экспериментах для обоснования вибропрочности АДФ (циклической прочности и стойкости к износу) в первую очередь необходимо смоделировать условия нагружения в активной зоне, т.е. поместить АДФ в поток теплоносителя. Имитация температурных условий для изделий из нержавеющей стали не является приоритетной, поэтому испытания можно проводить в холодной воде.

Такая методика имеет ряд преимуществ перед моделированием нагрузок на вибростенде. При нагружении с помощью вибростенда на элементы АДФ действуют инерционные нагрузки, тогда как в потоке – гидродинамические. Инерционные нагрузки определяются массой изделия и ускорением, гидродинамические – параметрами потока (расходом, пульсациями давления) и площадью, на которой эти нагрузки воздействуют. АДФ обладает развитой поверхностью и малой массой, т.е. чтобы смоделировать вибрацию от потока инерционными нагрузками потребуются приложить к хвостовику вибрацию, значительно превосходящую его вибрацию в реакторе. Также в испытаниях на воздухе или в стоячей воде не обеспечиваются условия по выносу продуктов возможного износа из зоны контакта деталей.

Проведение ресурсных испытаний АДФ запланировано на гидравлическом контуре стенда сейсмических и вибрационных испытаний ТВС при расходе воды через хвостовик от 500 до 550 м<sup>3</sup>/ч и температуре от 50 до 60 °С. Продолжительность испытаний составит 1000 часов, с остановками на инспекцию АДФ каждые 100 часов. Оснастка для испытаний аналогична используемой при испытаниях по определению фильтрующей способности, схема оснастки изображена на рисунке 11.

Гидродинамические нагрузки со стороны теплоносителя заданы консервативно. Это подтверждается испытаниями по определению вибрации твэлов ТВС в потоке теплоносителя – было получено, что при одинаковом расходе уровень вибраций твэлов для температуры 60°С в 1,8 раза выше, чем для температуры 290°С.

Во время испытаний гидродинамическое нагружение происходило в виде широкополосной случайной вибрации и на детерминированных частотах 24,8 Гц и 149,2 Гц, что соответствует оборотной и лопаточной частоте насоса. За время испытаний на основных частотах возбуждения обеспечено количество циклов превышающее максимальное количество циклов при усталостных испытаниях конструкций согласно «ГОСТ 25.507-85 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения», равное  $10^6$ , а также сопоставимо либо превышает количество циклов при усталостных испытаниях металлов, равное  $10^7$ - $10^8$  (ГОСТ 25.502-79 Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость). Приемочным критерием является отсутствие нарушения целостности элементов АДФ.



1- верхний хвостовик; 2 – шестигранная труба; 3 – нижний хвостовик

Рисунок 11 – Схема оснастки для ресурсных испытаний АДФ



## **Заключение**

Из испытанных конструкций лучшим КГС обладает АДФ лабиринтной конструкции (тип 1). Однако его фильтрующая способность оказалась наименьшей из испытанных АДФ (28 % пропущенных частиц), поскольку данный АДФ имеет наибольший характерный размер ячейки.

Лабиринтный АДФ (тип 2) обладает хорошей фильтрующей способностью – одна пропущенная частица из 110. Учитывая, что характерный размер пропущенной частицы (диаметр 1,3 мм) больше проектного характерного размера ячейки фильтра (1,16 мм), пропускание частицы, по-видимому, было вызвано неточностями изготовления АДФ. К недостаткам данного АДФ можно отнести высокую отражающую способность (37 % отраженных частиц), высокую вероятность прохождения частиц с размерами меньше размера ячейки фильтра и низкие усилия фиксации задержанных частиц из АДФ, зачастую сопоставимые с их весом. Вследствие этого после выгрузки ТВС из активной зоны значительная часть дебрис-частиц может остаться в первом контуре.

Высокая фильтрующая и удерживающая способность АДФ сетчатого типа обусловлены конструкцией фильтра, в которой частицы собираются в углах, образованных пластинами, не перекрывая проходное сечение. Такая конструкция фильтра имеет вероятность задержания частиц с размерами, много меньшими размеров проливных отверстий в пластинах, что было продемонстрировано в эксперименте. Усилие удержания отфильтрованных частиц значительно превосходит вес частиц – ни одна частица не выпала из фильтра ни в ходе технологических операций, ни в результате ударов по хвостовику. К недостаткам фильтра стоит отнести высокий КГС.

Испытанные фильтры не повышают уровни вибрации твэлов нижних пролетов ТВС и являются скорее успокоителями потока, снижая уровень вибраций. Вопрос изменения уровней вибрации твэлов соседних ТВС в переходных зонах нуждается в дополнительном исследовании.

### **Список обозначений и сокращений**

АДФ	- антидебрисный фильтр
ВВЭР	- водо-водяной энергетический реактор
ТВС	- тепловыделяющая сборка
твэл	- тепловыделяющий элемент

### **Список литературы**

- [1] О ходе реализации стратегии движения к «нулевому отказу» ядерного топлива. Атомный эксперт, Информационно-аналитическое издание, приложение к научному журналу «Атомная энергия» № 6 (48), июль 2016 г.
- [2] D. Dangouleme, V. Inozemtsev, K. Kamimura, J. Killeen, A. Kucuk, V. Novikov, V. Onufriev, M. Tayal. Preliminary results of the IAEA review on fuel failures in water cooled reactors. Proceedings of Top Fuel 2009, Paris, France, September 6-10, 2009