

О РЕЗУЛЬТАТАХ ИСПЫТАНИЙ АНТИДЕБРИСНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРОВ ВВЭР-440

В.А. Гашенко, В.С. Курсков, О.Н. Абакумова, В.Д. Локтионов
**Федеральное государственное унитарное предприятие «Электрогорский
 научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций»,
 г. Электрогорск Московской обл., Россия**

Во ФГУП ЭНИЦ создан экспериментальный циркуляционный стенд "Фильтр-1", предназначенный для проведения испытаний антидебрисных фильтров применительно к ТВС РУ с водным теплоносителем типа ВВЭР-440 (1000). В процессе выполненного исследования была отработана методика испытаний на стенде "Фильтр-1", а затем экспериментально оценена эффективность и определены гидравлические характеристики антидебрисных фильтров конической формы. Каждый из антидебрисных фильтров представлял собой конус, собранный из колец различного диаметра с толщиной стенки 1,5 мм, изготовленных из нержавеющей стали. Фильтры отличались между собой шириной кольцевых щелей (размерами в свету) 1,15; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0 мм и соответственно высотой конической части (конуса). Полученные результаты имеют важное практическое значение с позиции решения вопроса об оснащении ТВС ВВЭР антидебрисными фильтрами.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ результатов многочисленных исследований негерметичных тепловыделяющих сборок реакторных установок с водным теплоносителем ТВС (кассет) различных конструкций показал, что причиной преждевременного выхода их из строя в более чем половине случаев явилось взаимодействие оболочек твэлов с присутствующими в теплоносителе посторонними предметами (дебрисом). При сквозном повреждении оболочки твэла дебрисом и попадании теплоносителя под оболочку наблюдается развитие вторичных дефектов, в том числе выход в теплоноситель продуктов взаимодействия активного топлива с водой.

Способом уменьшения числа отказов ТВС по причине повреждения оболочек твэлов дебрисом является установка антидебрисных фильтров.

Антидебрисный фильтр должен удовлетворять ряду требований, а именно:

- фильтр должен обладать приемлемым гидравлическим сопротивлением;
- фильтр, как минимум, не должен "ухудшать" поле скоростей на входе в "активную зону" ТВС;
- фильтр не должен засоряться в условиях "залпового" вброса в ТВС дебриса;
- конструкция фильтра должна логично сочетаться с конструкцией ТВС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД «ФИЛЬТР-1» И ЕГО ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Во ФГУП ЭНИЦ создан экспериментальный стенд «Фильтр-1», предназначенный для проведения испытаний антидебрисных фильтров применительно к ТВС реакторных установок с водным теплоносителем. Принципиальная схема стенда приведена на рис. 1.

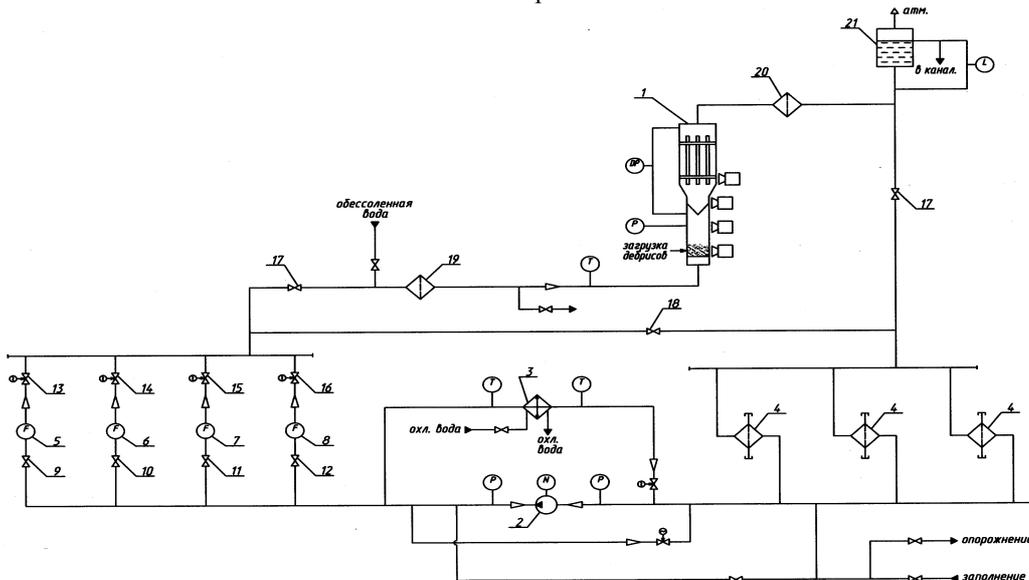


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда "Фильтр-1"
 1 - рабочий участок (РУ); 2 - насос; 3 - холодильник; 4 - грязевики;

5, 6, 7, 8 – измерительные участки; 9-12, 17, 18 – запорная арматура;
 13,14,15,16 – регулирующие клапаны; 19 – фильтр тонкой очистки;
 20 – фильтр-ловушка; 21 – бак-расширитель

Стенд представляет собой замкнутый циркуляционный контур объемом около 5,0 м³. В состав стенда входят следующие основные элементы и системы:

- рабочий участок (РУ) - 1;
- агрегат электронасосный 1Д500-63УХЛ4 – 2;
- холодильник для охлаждения электронасосного агрегата – 3;
- грязевики на всосе насоса – 4;
- измерительные участки – 5, 6, 7, 8;
- сетчатый фильтр тонкой очистки – 19;
- фильтр-ловушка для улавливания дебриса, загруженного в загрузочное устройство рабочего участка – 20;
- бак-расширитель для поддержания уровня воды в контуре стенда – 21;
- система трубопроводов с арматурой;
- электрооборудование.

Циркуляционный контур стенда выполнен из труб разного диаметра (Ø 377х9; 273х6; 219х6; 159х4,5; 108х3,5 и 76х3 мм). Заполнение стенда осуществляется питательной, артезианской или обессоленной водой.

Холодильник 3, представляющий собой кожухотрубчатый сосуд с поверхностью теплообмена 6 м², служит для поддержания в контуре стенда заданной температуры.

РАБОЧИЙ УЧАСТОК (РУ)

РУ стенда «Фильтр-1» (рис. 2) представляет собой сборку, состоящую из укороченного макета касеты ТВС, участка установки антидебрисного фильтра, участка стабилизации потока и загрузочного устройства, соединённых между собой фланцевыми разъёмами.

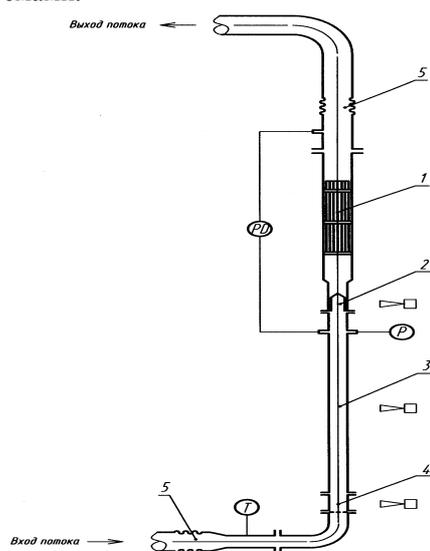


Рис. 2. Рабочий участок стенда «Фильтр-1»:

1 – макет ТВС; 2 – антидебрисный фильтр;
 3 – участок стабилизации потока; 4 – загрузочное устройство; 5 – сильфон Т – измерение температуры; PD и P – измерение перепада давления и давления в РУ. Фланцевые разъёмы служат для обеспечения разборки и монтажа прозрачных вставок

Внутренняя полость (геометрические размеры) макета полностью соответствует внутренней полости штатной ТВС (за исключением длины пучка и кожухотрубной трубы). Для уменьшения вибраций макета ТВС в контуре РУ были установлены сильфоны – 5.

На рис. 3 показана конструкция укороченного макета (длина 1076 мм) ТВС ВВЭР-440.

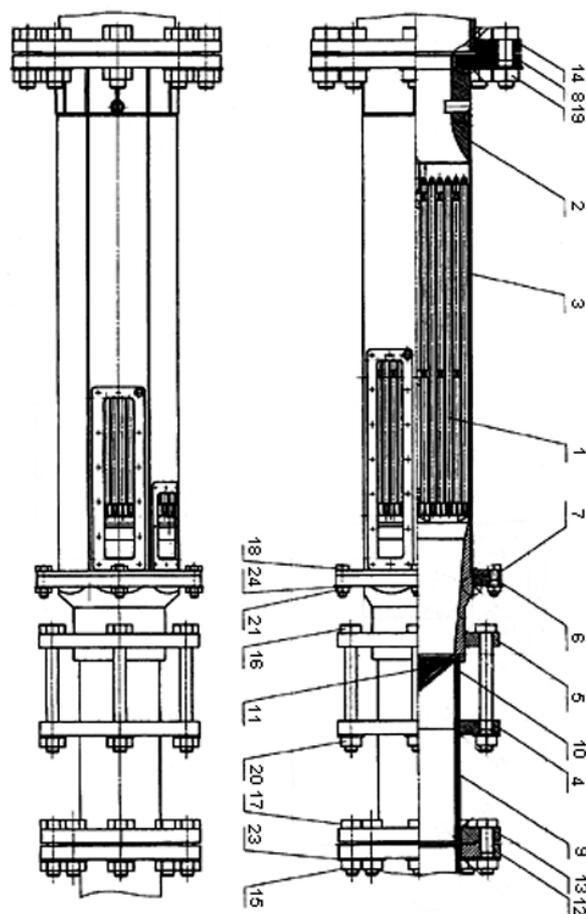


Рис. 3. Макет ТВС ВВЭР-440:

1 – пучок твэл; 2 – головка ТВС; 3 – кожухотрубчатая труба; 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 14 – фланцы; 9, 10 – хвостовик; 11 – антидебрисный фильтр; 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 – болтовые соединения

Кожухотрубчатая труба 3 (см. рис. 3) с внутренним размером под ключ 142 мм выполнена из нержавеющей стали и приварена к головке 2 и хвостовику 9, 10. В качестве головки макета взята штатная головка. Пучок имитаторов твэлов 1 длиной 457 мм содержит 126 штук пустотелых имитаторов твэлов со штатными

ми заглушками, скрепленными двумя дистанционирующими решетками (ДР).

Пучок имитаторов твэлов закреплен на опорной решетке с помощью штатной шплинтовочной проволоки.

В качестве хвостовика макета взят штатный хвостовик, цилиндрическая часть которого на длине около 100 мм выполнена прозрачной из осветленного плексигласа и соединена с остальной цилиндрической частью хвостовика с помощью фланцевых соединений. Внутренний диаметр прозрачного плексигласового соединения составляет 96 мм.

Опорная решетка макета представляет собой штатную нижнюю решетку и соединена с хвостовиком не на сварке, а с помощью винтов для обеспечения извлечения пучка после испытаний.

Прозрачные окна в кожуховой трубе макета (рис. 4) служат для визуального наблюдения и проведения видеосъемки перемещения дебриса, а именно:

- окно № 1 обеспечивает возможность наблюдения перемещения дебриса от опорной решетки до 1-й ДР, включая и её.
- окно № 2 обеспечивает визуальное наблюдение и видеосъемку входа дебриса в опорную решетку.

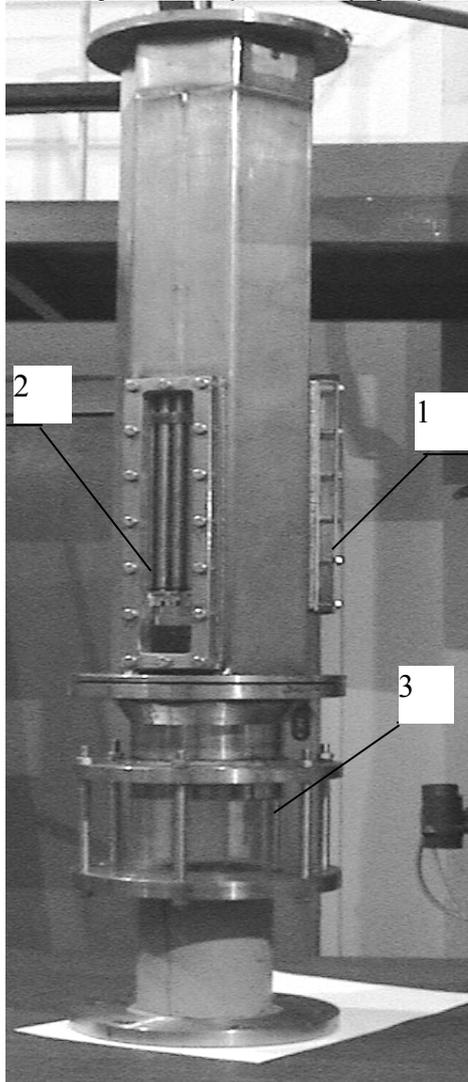


Рис. 4. Внешний вид макета ТВС ВВЭР-440:
1 – прозрачное окно № 1; 2 – прозрачное окно № 2;
3 – прозрачный стакан № 3 (место установки антидебрисного фильтра)

Прозрачный стакан № 3 (место установки антидебрисного фильтра) обеспечивает возможность наблюдения и проведение видеосъемки перемещения дебриса на подходе к антидебрисному фильтру и их поведения при контакте с фильтром.

Макет ТВС полностью разборный: снимается кожух, меняются сменные антидебрисные фильтры, извлекается шплинтовочная проволока, имитаторы твэлов.

Ниже размещена прозрачная труба 3 (см. рис. 2) du 96 - участок стабилизации потока, позволяющая наблюдать (проводить видеосъемку) на длине около 1 метра за характером перемещения дебриса разных геометрических размеров (длина, диаметр, масса) из различных материалов и качественно оценить особенности поля скоростей потока по сечению трубы.

В нижней части РУ (см. рис. 2) между фланцами установлено загрузочное устройство 4, представляющее собой отрезок прозрачной трубы (du 96) из осветленного плексигласа наружным диаметром около 125 мм, толщиной стенки 14 мм и высотой около 100 мм, опирающийся в нижнем фланце на нержавеющую сетку с размером в свету 0,4 мм. Загрузочное устройство служит для размещения в нём дебриса перед проведением экспериментов.

При наблюдении поведения дебриса в загрузочном устройстве фиксируются характер всплывания дебрисных частиц и перемещения их при различных расходах водного потока в контуре.

СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ СТЕНДА «ФИЛЬТР-1»

Контрольно-измерительная система обеспечивает контроль работы и регистрацию основных параметров стенда, а именно расхода воды через рабочий участок, перепадов давления на антидебрисном фильтре и макете ТВС, температуры воды и давления в контуре РУ, уровня воды в сосуде. Контрольно-измерительная система включает в себя набор датчиков, оптическую видеоинформационную систему и систему сбора и хранения данных.

В системе используются как стандартные, так и нестандартные средства измерений. С помощью стандартных датчиков (типа МЕТРАН) измеряются расход воды (перепад давления на диафрагме), давление в циркуляционном контуре РУ, а также уровень воды в расширительном баке. Измерение температуры воды производится при помощи термометров сопротивления. Нестандартными средствами обеспечивается проведение видеонаблюдений процесса переноса дебриса и эффективности работы фильтров различной конструкции с последующей компьютерной обработкой изображений. Видеосистема состоит из видеокамер (3 штуки), видеомагни-

Рис. 6. Принципиальная схема системы видеонаблюдений:

1 – видеокамера; 2- осветители; 3- видеомagneтофон; 4- плата видеозахвата; 5- компьютер; 6 – рабочий участок

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе выполненного исследования на первом этапе была отработана методика испытаний на стенде «Фильтр-1», а затем экспериментально оценена эффективность и определены гидравлические характеристики антидебрисных фильтров конической формы, разработки ОАО МСЗ и ОКБ «Гидропресс». Каждый из антидебрисных фильтров (рис. 7) представлял собой конус, собранный из колец различного диаметра с толщиной стенки 1,5 мм, изготовленных из нержавеющей стали. Фильтры отличались между собой шириной кольцевых щелей (размерами в свету) 1,15; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0 мм и соответственно высотой конической части (конуса).



Рис. 7. Внешний вид антидебрисных фильтров

В процессе наладочных пусков стенда было исследовано (без дебриса) влияние положения фильтра (конусом вверх или вниз) на величину перепада давления, которые показали, что положение антидебрисного фильтра на величину перепада давления практически влияния не оказало. Далее все эксперименты были проведены при установке фильтра конусом вверх.

В качестве базового при выполнении программы исследований был принят сценарий эксперимента, при котором:

- в загрузочное устройство загружался определенный, одинаковый для всех выполненных экспериментов, набор дебриса (различного геометрического размера из различного материала);
- стенд заполнялся водой, включался насос и устанавливался (дискретно) требуемый расход теплоносителя через рабочий участок от 0 до 130 м³/ч при температуре (25±5) °С;

– процесс эксперимента контролировался системами КИП и АСНИ стенда и видеосистемой. При этом фиксировались текущие параметры процесса (температура теплоносителя, давление перед РУ и перепад давления на нём).

Оценка эффективности работы антидебрисных фильтров осуществлялась путём:

- визуального (и видео) наблюдения в процессе проведения испытаний;
- подсчета количества дебриса, прошедшего фильтр;
- измерения перепада давления на участке макета ТВС в процессе проведения испытаний;
- визуального осмотра антидебрисного фильтра и макета ТВС.

После каждого эксперимента производилась разборка РУ: извлекались – загрузочное устройство, фильтр, макет ТВС и подсчитывалось количество каждого вида дебриса, обнаруженного в различных зонах РУ (всего по высоте РУ было определено 10 зон, в которых мог застревать дебрис).

Как показал анализ полученных результатов, с увеличением размера в свету фильтра увеличивается число дебриса, прошедшего через фильтр, далее через опорную и ДР и вышедших из ТВС.

Чтобы оценить эффективность задержания дебриса исследуемыми антидебрисными фильтрами, по сравнению с таковой у макета ТВС без фильтра был проведен эксперимент на ТВС, не защищенной антидебрисным фильтром. В загрузочное устройство был помещен тот же набор дебриса, что и в экспериментах с антидебрисными фильтрами.

Согласно полученным результатам количество дебриса, застрявшего в макете ТВС, и дебриса, прошедшего его, примерно в 2 раза больше, чем при испытании макета ТВС с фильтрами с размерами в свету (1,5 и 2,0 мм).

Наименее эффективным по задержанию дебриса оказался фильтр с размером в свету 4,0 мм.

Анализ полученных результатов показал, что перепад давления на макете ТВС с фильтром зависит от размера в свету антидебрисного фильтра – возрастает с его уменьшением.

Абсолютные значения перепада давления, а также вклад в перепад давления антидебрисных фильтров (гидравлическое сопротивление) при максимальном расходе 130 м³/ч приведены в таблице.

Эффективность и гидравлическое сопротивление антидебрисных фильтров

| Исполнение макета ТВС | Эффективность задержания дебриса, % | Перепад давления, кПа | Перепад давления на фильтре, кПа |
|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Макет ТВС с фильтром 1,15 мм | 83,4 | 62 | 31 |
| Макет ТВС с фильтром 1,5 мм | 75,8 | 55 | 24 |
| Макет ТВС с фильтром 2,0 мм | 68,9 | 52 | 21 |
| Макет ТВС с фильтром 3,0 мм | 60,2 | 40 | 9 |
| Макет ТВС с фильтром 4,0 мм | 44,7 | 39 | 8 |
| Макет ТВС без фильтра | 46,0 | 31 | |

В качестве представляющего практический интерес результата проведенных испытаний можно отметить, что мелкий дебрис (проволока длиной от 5 до 50 мм Ø1; 1,2; 2,0 мм, шайбы толщиной 1мм и Ø 6 мм, циркониевые пластинки толщиной 0,5 мм), который проходил через фильтр, в большинстве своём уносился потоком теплоносителя через проливные отверстия хвостовика к периферии ТВС и застревал между кожухом и поверхностью твэлов. Такое расположение дебриса затрудняло выемку макета ТВС из кожуха (происходило заклинивание дебриса и ДР, что приводило к её повреждению (рис. 8). Данные по эффективности задержания дебриса фильтрующими устройствами представлены в таблице. Видно, что с уменьшением размера в свету антидебрисных фильтров увеличивается эффективность задержания дебриса.

Экспериментально установлено (показано) также, что проволока длиной 200 мм Ø 1,2; 2,0 и 3,0 мм может проходить через фильтры с размерами в свету 2,0; 3,0 и 4,0 мм соответственно.



Рис. 8. Характер повреждения ДР при выемки ТВС

Количество дебриса, имеющего значительную длину (от 50 до 200 мм) и вошедшего в кассету, крайне незначительно (наблюдались единичные случаи проникновения дебриса при испытании макета ТВС без антидебрисного фильтра, с фильтрами с размерами в свету 3,0 и 4,0 мм, а также с фильтрующим устройством в виде сочетания опорная решетка и ДР).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты имеют важное практическое значение с точки зрения решения вопроса об оснащении ТВС ВВЭР антидебрисными фильтрами.

Целесообразно проведение дальнейших работ по совершенствованию конструкций антидебрисных фильтров, направленных на:

- повышение антидебрисной эффективности фильтров;
- незначительное увеличение гидравлического сопротивления ТВС, оснащенных фильтрами;
- сглаживание поля скоростей теплоносителя на входе в сборку;
- выполнение одновременно нескольких функций (крепления твэлов в опорной решетке, антивибрационного устройства, регулятора полей скоростей теплоносителя и т.д.).

ПРО РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ АНТИДЕБРИСНИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ТЕПЛОВІДЛЮЮЧИХ ЗБОРОК РЕАКТОРІВ ВВЕР-440

В.О. Гашенко, В.С. Курсков, О.М. Абакумова, В.Д. Локтіонов

Во ФГУП ЕНЦ створено експериментальний циркуляційний стенд «Фільтр-1», призначений для випробувань антидебрисних фільтрів стосовно ТВЗ РУ з водним теплоносієм типу ВВЕР-440 (1000). В процесі виконання досліджень була відпрацьована методика випробувань на стенді «Фільтр-1», а потім експериментально оцінена ефективність та визначені гідравлічні характеристики антидебрисних фільтрів конічної форми. Кожний із антидебрисних фільтрів – це конус, зібраний із кілець різного діаметра з товщиною стінки 1.5 мм, виготовлених із нержавіючої сталі. Фільтри відрізняються між собою шириною кільцевих щілин (розмірами до світла) 1.15, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 мм і відповідно висотою конічної частини (конуса). Отримані результати мають важливе практичне значення з позиції рішення питання про оснащення ТВЗ ВВЕР антидебрисними фільтрами.

ON RESULTS OF ANTIDEBRIS FILTERS FOR FUEL ASSEMBLIES OF REACTORS WVER-440

V.A. Gashenko, V.S. Kurskov, O.N. Abakumova, V.D. Loktionov

FSUE "EREC" developed a circulation test facility "Filter-1" used for testing of anti-debris filters as applied to VVER-440 (1000) RP FA with water coolant. In the course of investigations performed a test procedure was tested in test facility "Filter-1", and then the efficiency was evaluated experimentally and hydraulic characteristics of anti-debris filters of conic form were determined. Each of anti-debris filters represents a cone collected from rings of different diameters with wall thickness 1,5 mm made of stainless steel. Filters differ in width of annular slots (clear dimension) 1,15; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0 mm and consequently in height of flared section (cone). The results obtained are of great practical significance from the position of solving a problem of VVER FA equipping with anti-debris filters.