

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.039.58

ВОЗМОЖНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕГЕРМЕТИЧНОЙ ТВС ПРИ ОПЕРАТИВНОМ КОНТРОЛЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ СИПИНГ-МЕТОДОМ В ШТАНГЕ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ МАШИНЫ

Терещенко А.Б., Голубев Е.И. (Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж)
tereschenkoAB@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Для выяснения влияния на результаты оперативного контроля герметичности оболочек ТВЭлов сипинг-методом в штанге перегрузочной машины проведен анализ режимов работы ТВЭла и происходящих в нем процессов при подготовке и проведении перегрузки топлива в реакторе. Рассмотрены ТВЭлы, линейная мощность q_l которых близка к средней для ВВЭР-1000 152 Вт/см, и ТВЭл линейной мощностью 39 Вт/см.

При изготовлении в ТВЭл закачивается гелий под давлением 2 МПа, при температуре, соответствующей номинальной мощности, давление внутри средненапряженного герметичного ТВЭла составляет ~5 МПа [1]. При разгерметизации такого ТВЭла вода 1-го контура, находящегося под давлением 16 МПа, будет поступать под оболочку и испаряться, поскольку температура в зазоре между топливом и оболочкой выше температуры насыщения 348 °С. В результате под оболочкой будет образовываться смесь гелий—водяной пар—продукты деления, теплопроводность которой примерно в 3 раза ниже, чем гелия. Это приведет к росту температуры внутри ТВЭла (табл. 1). Вода будет поступать в ТВЭл до давления парогазовой смеси, равного внешнему давлению в 1-м контуре на уровне дефекта.

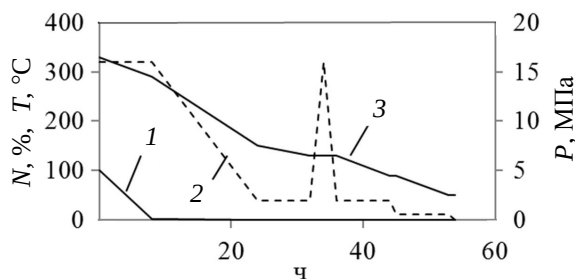
Т а б л и ц а 1. Температура в ТВЭле

$T, ^\circ\text{C}$	$q_l, \text{Вт/см}$	
На выходе из ТВС	312	294
Гелий:		
в зазоре	410	320
в центре	660	380
Пар:		
в зазоре	610	360
в центре	1050	460
средняя в топливе	1000	400

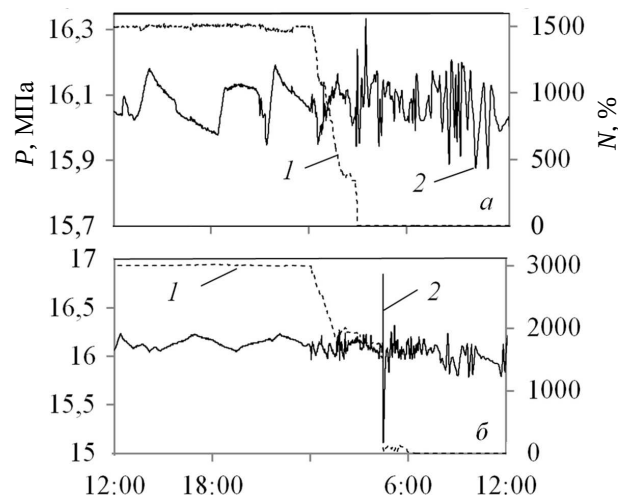
При снижении мощности реактора в ходе останова температура теплоносителя уменьшается до 288—290 °С. Затем происходит одновременное расхолаживание до температуры 120—130 °С и снижение давления до 2 МПа. Далее проводится расхолаживание ниже 100 °С и отключение ГЦН, разуплотнение 1-го контура. Примерно при 130 °С испытываются системы аварийного расхолаживания высокого давления, для чего давление повышается до номинального. После разуплотнения перед разборкой реактора уровень теплоносителя снижается менее главного разъема, перед перегрузкой поднимается. Изменение параметров при останове реактора показано на рис. 1.

Для ТВЭла с объемом газа под оболочкой 24 см³, в том числе с компенсационным объемом 11,8 см³ оценено количество воды, поступившей в негерметичный ТВЭл. При номинальных давлении, температуре теплоносителя и мощности реактора ~1% в ТВЭле содержится ~1,5 г водяного пара, и это количество почти не зависит от мощности ТВЭла до останова реактора.

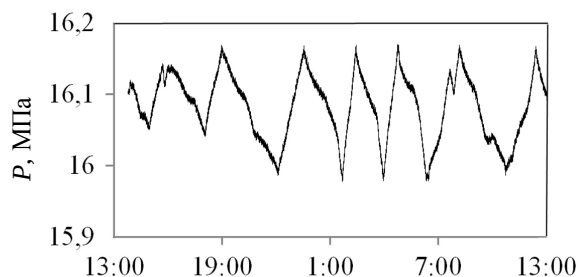
Изменение основных параметров реактора при останове на примере двух кампаний показано на рис. 2. В одной кампании при мощности $N < 10\%$ наблюдали серию колебаний давления с периодом 10 с и амплитудой 0,3 МПа (см. рис. 2, а), в другой



Р и с. 1. Обобщенные параметры при останове: 1 — мощность реактора; 2 — давление в 1-м контуре; 3 — температура теплоносителя



Р и с. 2. Мощность (1) и давление (2) в 1-м контуре при останове реактора

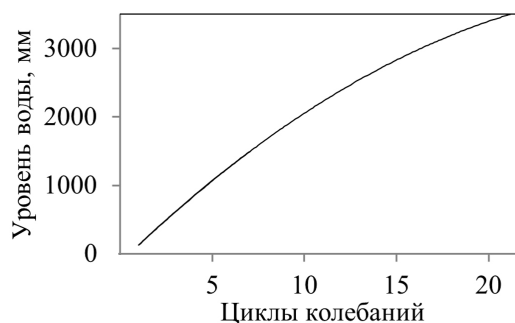


Р и с. 3. Колебания давления в 1-м контуре при работе реактора в стационарном режиме

(см. рис. 2, б) — 26 с и 1,6 МПа соответственно, обусловленных работой регулятора давления, который и при стационарных условиях создает колебания давления с амплитудой 0,2 МПа и периодом около 3 ч (рис. 3). Следовательно, на остановленном реакторе при температуре в твэле ниже температуры насыщения колебания давления приведут к впрыску воды под оболочку. В рассмотренных примерах останов блока число наблюдавшихся колебаний давления с начала разгрузки до начала снижения давления в контуре в ходе расхолаживания составило 16—32.

Зависимость заполнения твэла водой при останове блока и типичных колебаниях давления в ходе останова $\pm 0,3$ МПа в предположении мгновенного поступления и выхода воды из твэла показана на рис. 4. При дефекте оболочки внизу топливного столба уровень воды в твэле то повышается на ~ 250 мм, то твэл осушается с периодом 10—30 с. Твэлы с дефектом в середине иверху топливного столба будут постепенно при каждом циклическом повышении давления заполняться водой с почти одинаковой скоростью, и вода достигнет уровня дефекта в оболочке за 9 и 22 цикла соответственно.

Таким образом, перед началом расхолаживания и сопутствующего снижения давления твэл с дефектом внизу топливного столба будет без воды, твэлы с



Р и с. 4. Заполнение твэла водой при колебаниях давления в 1-м контуре $\pm 0,3$ МПа

дефектами в середине иверху заполнятся водой до уровня отверстий. Очевидно, при малых размерах дефекта, когда гидравлическое сопротивление отверстия будет влиять на расход как воды, так и газа, заполнение замедлится, потребуется больше циклов колебания давления.

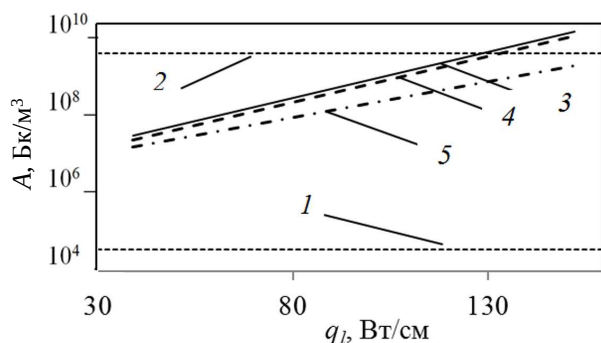
Анализ показал, что в результате всех операций по останову реактора с соответствующими изменениями давления и температуры, его разборки и подготовки к перегрузке в негерметичном твэле останется только часть исходного (до останова блока) объема газовой смеси (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Объем и концентрация ^{133}Xe в газе, выходящем из твэла при оперативном контроле герметичности оболочек в результате изменения давления и температуры в ходе подготовки к перегрузке

Параметр	Положение дефекта в твэле		
	Низ	Середина	Верх
Объем выходящего газа, см ³	5,58/5,58*	4,74/4,74	3,56/3,56
Доля исходного ^{133}Xe , выходящего из твэла при его подъеме (без учета распада после останова), %	1,91/1,94	1,73/1,76	1,55/1,59

* $q_l = 152/39$ Вт/см.

Далее при оперативном контроле герметичности оболочек твэлов в ходе перегрузки ТВС поднимается в транспортное положение, что приводит к выходу газовой смеси из твэла. Анализ выхода газовых продуктов деления под оболочку твэлов водо-водяных реакторов под давлением показал, что при линейной мощности твэла до ~ 200 Вт/см и выгорании топлива до 20—30 МВт·сут/кг, характерном для ТВС после первой кампании, количество газовых продуктов деления, выходящих под оболочку твэла, можно с достаточной для оценок надежностью принять равным 0,5% [2]. Тогда активность ^{133}Xe под оболочкой со-



Р и с. 5. Зависимость объемной активности поступающего на радиометр газа через 20 сут после останова от средней линейной мощности твэла при различных положениях дефекта по высоте твэла: 1, 2 — нижний и верхний предел чувствительности радиометра соответственно; 3, 4, 5 — дефект внизу, в середине и вверху топливного столба соответственно

ставит $6,77 \cdot 10^{11}$ и $1,4 \cdot 10^9$ с⁻¹ для твэла линейной мощностью 152 и 39 Вт/см соответственно. При объеме барботажного воздуха 15 л объемная активность ¹³³Xe, поступающего на бета-радиометр системы оперативного контроля герметичности оболочек твэлов, без учета его распада после останова для твэла линейной мощностью 152 Вт/см составляет, 10^{11} Бк/м³: 2, 1,5 и 1 при дефекте внизу, в середине и вверху топливного столба, для твэла линейной мощностью 39 Вт/см, 10^8 Бк/м³: 4,2, 3,2 и 2,2 соответственно.

На рис. 5 видно, что на 20-е сут после останова реактора при диапазоне измерений радиометра от 37 кБк/м³ негерметичный твэл независимо от его энергонапряженности при работе в активной зоне может быть выявлен в ходе оперативного контроля герметичности.

Согласно [3] при всплытии пузырьки воздуха поднимаются по прямолинейной, зигзагообразной или спиральной траектории. Расчетами установлено, что характер траектории зависит от диаметра пузырька:

1 мм — прямолинейная с незначительными колебаниями в горизонтальной плоскости (~2 мм);

3 мм — зигзагообразная с колебаниями в горизонтальной плоскости ~10 мм;

5—10 мм — зигзагообразная с переходом в спиралевидную (вокруг наклонной и осциллирующей оси) и увеличением отклонений в горизонтальной

плоскости до 10—20 мм. Там же указывается, что расчетная амплитуда колебаний в плоскости, перпендикулярной основной оси спирали/зигзага, близка к измеренным — для пузырька диаметром 2,5 мм амплитуда составляет 4,3 мм.

Из сравнения внутреннего диаметра хвостовика ТВС ВВЭР-1000, -1200 и ее размера «под ключ» видно, что при барботаже всплывающие пузырьки воздуха обтекают около 50% сечения твэльного пучка. Для охвата всех твэлов газовые пузырьки должны отклониться от вертикального всплытия на 30—50 мм. Таким образом, можно предположить, что при существующей конструкции хвостовика ТВС ВВЭР-1000, -1200 при подаче в ходе оперативного контроля герметичности оболочек твэлов барботажного воздуха под ее хвостовик всплывающий воздух не омывает примерно 50% периферийных твэлов, не попадающих в проекцию отверстия в хвостовике. Это может быть причиной того, что ТВС с негерметичными твэлами окажется невыявленной. Влияние нижней опорной решетки ТВС на распределение пузырьков воздуха по сечению пучка твэлов требует отдельного изучения. Часть пузырьков воздуха, всплывающих снаружи ТВС, могут частично омывать периферийные твэлы бесчехловых ТВС и тем самым выносить газовые продукты деления негерметичных твэлов внешнего ряда.

Для повышения надежности выявления негерметичных твэлов при оперативном контроле герметичности оболочек для организации выноса газовых продуктов деления необходимо обеспечить равномерное распределение барботажного воздуха по сечению пучка твэлов ТВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильченко И.Н. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004.
2. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Козелков А.С., Курулин В.В., Лашкин С.В. и др. Численное моделирование свободного всплытия пузырька воздуха. Супервычисления и математическое моделирование. — В сб.: XVI Межд. конф. Саров, ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ», 2017, с. 142—152.

Поступило в Редакцию 27.12.22