

Сравнение теплогидравлических характеристик ТВС реакторов типа ВВЭР и PWR на основе экспериментов

**В.В.Большаков, Л.Л.Кобзарь, Ю.М.Семченков
РНИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия**

Введение

Одним из различий тепловыделяющих сборок реакторов типа ВВЭР и PWR является разная конструкция дистанционирующих решеток. В реакторах типа ВВЭР используются дистришетки сотового типа, отличающиеся простотой конструкции, незначительной массой конструкционного материала, небольшим гидравлическим сопротивлением. Дистришетки реакторов типа PWR имеют более сложную конструкцию и, помимо дистанционирования твэлов, выполняют еще функцию интенсификации массо- и теплообмена за счет наличия элементов, отклоняющих и закручивающих поток теплоносителя.

Выбор конструкций дистришенок в реакторах ВВЭР и PWR имел множество причин объективного и субъективного характера, но в целом этот выбор можно признать вполне логичным.

Внедрение решеток-интенсификаторов в конструкцию ТВС реакторов PWR было предопределено тем, что квадратная упаковка твэлов, используемая в реакторах PWR, изначально проигрывает треугольной упаковке, выбранной для реакторов ВВЭР, из-за большей неравномерности расхода теплоносителя по периметру твэла и, соответственно, большей неравномерностью подогревов теплоносителя в пределах ячейки пучка. Поэтому логично было предусмотреть перемешивание теплоносителя прежде всего в пределах ячейки и одновременно – в пределах всего поперечного сечения ТВС. Тем более что в квадратной решетке имеются благоприятные условия для размещения отклоняющих элементов в достаточно просторных центральных зонах ячеек пучка. В последнее время прослеживается тенденция к увеличению благоприятного эффекта дистанционирующих решеток в реакторах PWR за счет удвоения числа решеток в верхней половине ТВС.

Для треугольной упаковки твэлов, используемой в реакторах типа ВВЭР, в меньшей степени требуется перемешивание теплоносителя внутри ячейки из-за более равномерного, чем в квадратной упаковке, азимутального изменения межтвэльных зазоров. К тому же указанное положительное качество треугольной упаковки, обеспечивающее равномерное азимутальное распределение расходов и подогревов теплоносителя, становится отрицательным при попытках размещения специальных элементов, воздействующих на поток теплоносителя. Тем не менее в связи с начавшейся в России разработкой реактора проекта АЭС-2006, отличающегося повышенными технико-экономическими показателями, поставлен вопрос о внедрении в конструкцию ТВС специальных решеток, интенсифицирующих поперечное перемешивание теплоносителя и теплообмен. В плане решения этой задачи представляют интерес экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению и кризису теплоотдачи, полученные в РНИЦ «Курчатовский институт» в исследованиях 25-стержневой модели ТВС реактора типа PWR.

Экспериментальное оборудование

Эксперименты проведены в РНИЦ «Курчатовский институт» на теплофизическом стенде КС, который предназначен для исследования теплогидравлических процессов в нормальных, переходных и аварийных режимах работы водоохлаждаемых реакторов. Стенд имеет два самостоятельных первых контура: петлю низкого давления (ПНД) и петлю высокого давления (ПВД). Петля низкого давления допускает максимальное рабочее давление 9,8 МПа. Описываемые в настоящем докладе эксперименты проведены на петле высокого давления, в состав которой входят первый контур, система охлаждения, система подпитки и компенсации изменений объема, система подготовки и очистки дистиллята.

Параметры первого контура ПВД:

- теплоноситель дистиллят;
- максимальное рабочее давление, МПа 16,7;
- максимальный расход теплоносителя через модель ТВС, т/ч 50;
- располагаемая мощность электронагрева моделей ТВС, кВт 8000.

Электронасос ЦЭН-131, обеспечивающий циркуляцию теплоносителя в первом контуре, представляет собой центробежный бессальниковый насос вертикального исполнения, электропривод и гидравлическая часть которого смонтированы в едином блоке.

Техническая характеристика насоса:

- производительность, т/ч 50;
- максимальное давление на всасывании, МПа 31,4;
- максимальная температура дистиллята $(t_s - 25)^\circ\text{C}$, но не выше 350°C ;
- напор, МПа $\leq 2,5$.

Единая для ПВД и ПНД система охлаждения стенда КС включает второй и третий контуры.

Параметры теплоносителя второго контура:

- теплоноситель дистиллят;
- давление, МПа до 0,7;
- максимальная температура, $^\circ\text{C}$ 150;
- максимальный расход, т/ч 200.

В качестве охлаждающей среды 3-го контура используется вода Москва-реки.

В ПВД имеется два параллельных экспериментальных участка. В экспериментальном участке В-19 могут быть установлены 19-стержневые модели ТВС реактора ВВЭР или 16-стержневые модели ТВС реактора РWR; экспериментальный участок В-37 рассчитан на установку 37-стержневых моделей ТВС реактора ВВЭР или 25- и 36-стержневых моделей ТВС реактора РWR.

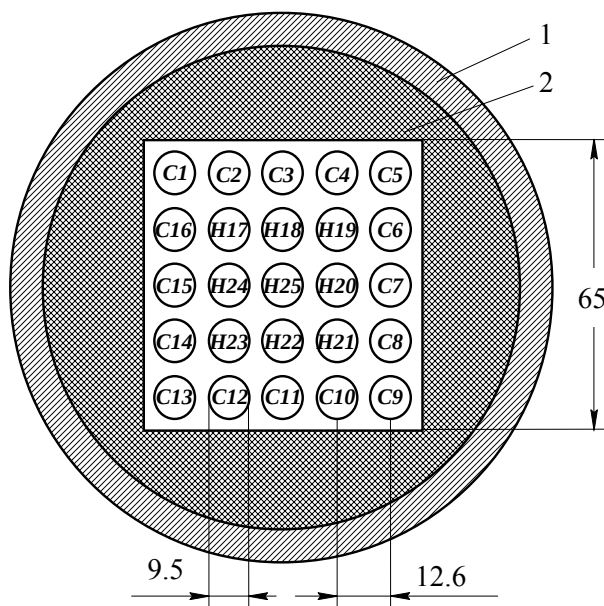
Оба экспериментальных участка моделируют активную зону реактора с сохранением наиболее важных геометрических размеров и представляет собой вертикальный корпус с размещаемым внутри пучком нагревательных элементов, имеющим верхний и нижний токоподводы. Вход и выход теплоносителя в экспериментальных участках – боковые. Тепловыделение осуществляется за счет пропускания выпрямленного электрического тока по трубчатым имитаторам твэлов.

Электропитание экспериментальных участков осуществляется от преобразовательной подстанции общей мощностью 8000 кВт. Подстанция состоит из четырех управляемых тиристорных выпрямителей, выходная мощность каждого из которых равна 2000 кВт. Напряжение выпрямленного тока изменяется от 0 до 150 В на 1-м диапазоне регулирования и от 150 до 300 В на втором диапазоне.

Система измерений и сбора данных, именуемая в технической документации стенда КС как система автоматизации эксперимента (САЭ), служит для измерения различных параметров, фиксирования измеренных параметров, выдачи сигналов предупредительной сигнализации и аварийной защиты. В процессе выполнения экспериментов на стенде КС измеряются мощность электронагрева пучка имитаторов твэлов, температуры имитаторов твэлов и теплоносителя, давления в различных точках контура циркуляции, перепады давления, расходы теплоносителя, весовые уровни и другие параметры. САЭ обеспечивает связь с 320-ю измерительными каналами и позволяет расширить поля сигналов до 1024. В описываемых экспериментах измерялся 231 параметр. Период однократного опроса n датчиков определяется выражением:

$$T = 0,00015 n + 0,001, \text{ сек.} \quad (1)$$

Основными элементами экспериментального участка В-37, использованного в экспериментах, являются корпус давления, набор электроизоляционных талькохлоритовых втулок и электронагреваемый пучок (рис. 1).



1 — корпус давления, 2 — электроизоляционная втулка,
C1 – C16 и H17 – H25 — соответственно «холодные» и «горячие» имитаторы твэлов.

Рис. 1. Поперечное сечение экспериментального участка

Корпус экспериментального участка представляет собой обечайку с приваренными к ней верхним, нижним и двумя боковыми фланцами. К верхнему фланцу подсоединяется пучок нагревательных элементов, к нижнему – нижний токоподвод, а к боковым – подводящий и отводящий трубопроводы. Кроме того, корпус имеет ряд штуцеров, расположенных на разных уровнях и предназначенных для подсоединения к ним импульсных линий для измерения перепадов давления по высоте пучка.

Между корпусом экспериментального участка и пучком расположен набор электроизоляционных талькохлоритовых втулок, образующих канал квадратного поперечного сечения с размером стороны квадрата 65 мм.

В канале, образованном талькохлоритовыми втулками, расположен пучок, который включает 25 нагревательных элементов. Нагревательные элементы наружным диаметром 9,5 мм расположены в пучке по квадратной решетке с шагом 12,6 мм.

Фиксация взаимного расположения нагревательных элементов осуществляется дистанционирующими решетками, расположенными по высоте с шагом 254 мм. Используются дистанционирующие решетки трех видов, имеющие разную конструкцию и разный размер в направлении продольной оси пучка. В верхней половине пучка чередуются решетки двух типов: MV (Mixing Vane Grid) и IFM (Intermediate Flow Mixer); конструкция решеток обоих типов обеспечивает отклонение и закрутку теплоносителя. В нижней части пучка решетки типа MV чередуются с решетками типа SS (Simple Support Grid); последние предназначены только для дистанционирования имитаторов твэлов. Решетки всех трех видов были предоставлены заказчиком экспериментов.

Нагревательный элемент пучка состоит из имитатора твэла (тепловыделяющей части длиной 4267 мм, моделирующей твэл реактора PWR), а также верхней и нижней токоподводящих частей из меди. Имитатор твэла выполнен из трубы с наружным диаметром 9,5 мм и с переменной толщиной стенки (11 ступенек на половине длины), что обеспечивает

аксиальную неравномерность тепловыделения. Верхняя часть нагревательного элемента пучка выполнена из медной трубки с наружным диаметром 9,5 мм и с толщиной стенки 2 мм, а нижняя - из медного стержня с наружным диаметром 9,5 мм.

В пучке имеется два вида имитаторов твэлов: «горячие» и «холодные». «Горячими» являются 9 имитаторов, расположенных внутри пучка (рис. 1), «холодными» – 16 периферийных имитаторов. Оба вида имитаторов твэлов изготавливаются из одного и того же материала – сплава на основе никеля. «Горячие» имитаторы твэлов имеют большую толщину стенки, чем «холодные», благодаря чему суммарное тепловыделение у «горячего» имитатора выше, чем у «холодного», в 1,22 раза, а отношение тепловыделения «горячего» имитатора к среднему по пучку тепловыделению составляет 1,14.

На рис. 2 совмещены три аксиальных распределения относительного тепловыделения: Относительное тепловыделение

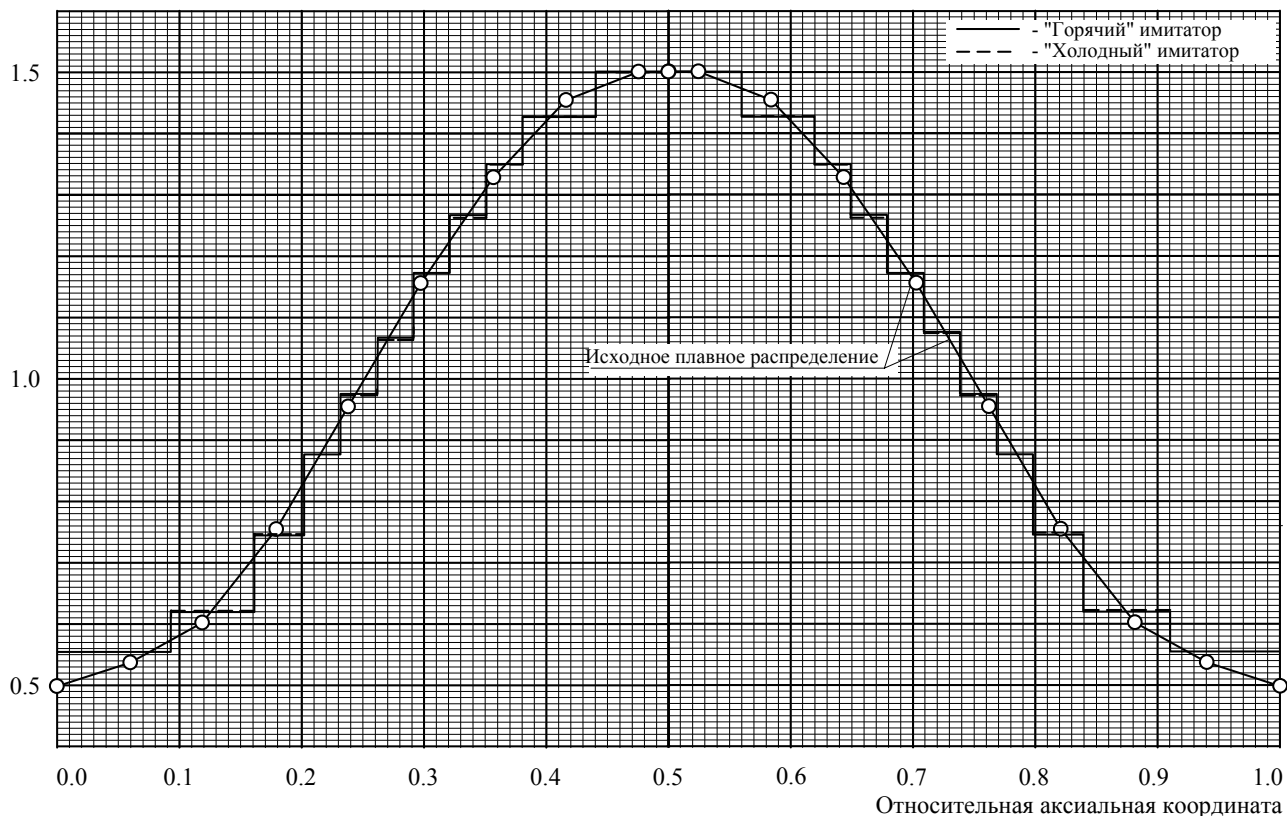


Рис. 2. Аксиальные распределения относительного тепловыделения для «горячих» и «холодных» имитаторов твэлов

- заданное заказчиком непрерывное аксиальное распределение тепловыделения (заданные точки на рисунке 2 соединены прямыми линиями);
- ступенчатое распределение тепловыделения для «горячих» имитаторов твэлов (сплошная линия);
- ступенчатое распределение тепловыделения для «холодных» имитаторов твэлов (пунктирная линия).

Представленные на рис. 2 ступенчатые распределения тепловыделения рассчитаны на основании размеров ступенек в рабочих чертежах, по которым изготавливались имитаторы.

Каждый имитатор твэла изготовлен из двух идентичных половин, соединенных сваркой.

После изготовления имитаторов твэлов производились измерения электрического сопротивления каждой ступени, суммарное электрическое сопротивление каждой половины имитатора и каждого имитатора в целом после соединения половин. Эти данные использовались для расчета действительных аксиальных распределений относительного тепловыделения для каждого имитатора твэла и относительных тепловыделений имитаторов

в составе пучка (табл. 1). Отклонения действительных локальных тепловыделений имитаторов от ступенчатых профилей, показанных на рисунке 2, не превышали 2%.

Таблица 1
**Относительные тепловыделения имитаторов
твэлов в пучке**

Обозначение имитатора на рис. 1	Относительное тепловыделе- ние
C1	0,924
C2	0,926
C3	0,926
C4	0,927
C5	0,924
C6	0,924
C7	0,925
C8	0,925
C9	0,925
C10	0,925
C11	0,924
C12	0,925
C13	0,925
C14	0,925
C15	0,925
C16	0,925
H17	1,129
H18	1,135
H19	1,129
H20	1,136
H21	1,130
H22	1,136
H23	1,130
H24	1,136
H25	1,140

Для фиксации кризиса теплоотдачи каждый из имитаторов твэлов был оснащен термопарным зондом, состоящим из 7-ми термопар, горячие спаи которых распределены по высоте в верхней половине зоны тепловыделения. Зонд вставлялся сверху внутрь имитаторов твэлов. В зонде использованы хромель-копелевые и хромель-алюмелевые термопары. Термопары изготовлены из провода типа ПОЖ.

7 термопар (14 термоэлектродов) зонда скручены в единый жгут, на который надет стеклочулок. При надевании стеклочулка участки термопар длиной 20 – 25 мм с неизолированными горячими спаями высывались наружу. Кончики термопар с горячими спаями притянуты к зонду стеклонитью, наматываемой на зонд в виде буртика. Буртик обеспечивает дистанционирование горячего спая относительно стенки имитатора твэла. Для улучшения дистанционирования буртик из стеклонити делался также ниже горячего спая термопары. На рис. 3 показан участок имитатора твэла с термопарным зондом.

Для измерения перепадов давления по длине пучка использованы 4 отбора статического давления, из которых первый отбор расположен в начале зоны тепловыделения, последний – в ее конце, остальные два отбора – в средней части пучка. В каждом из отборов имеется 4 отверстия диаметром 2 мм в талькохлоритовых втулках.

Методика проведения экспериментов

Целью экспериментов было определение перепадов давления по длине пучка и критических мощностей для набора режимов, различающихся давлением, массовой скоростью и входной температурой теплоносителя (табл. 2).

Вход в очередное кризисное состояние, заданное одной из точек в табл. 2, осуществлялся, как правило, повышением электрической мощности, подаваемой на пучок. Каждое из состояний достигалось несколько раз. При одном из входов в кризисное состояние

допускалось приближение к нему за счет увеличения входной температуры теплоносителя или за счет медленного снижения расхода теплоносителя или давления, при этом требовалось достичь кризиса теплоотдачи при одном из сочетаний определяющих параметров, указанных в табл. 2.

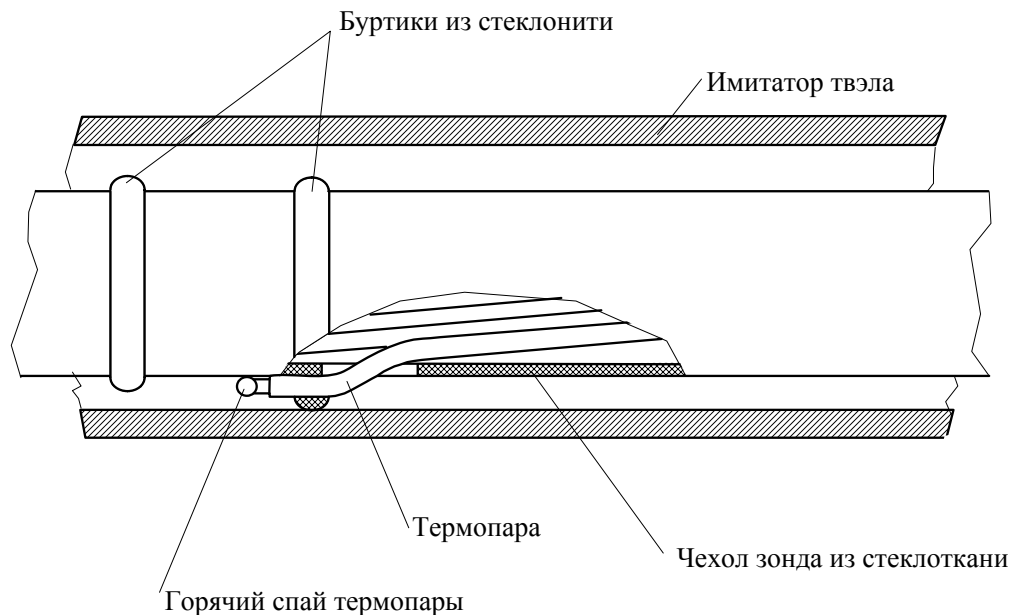


Рис 3. Участок имитатора твэла с термопарным зондом

В процессе приближения к кризисному состоянию с помощью САЭ производилась непрерывная запись всех измеряемых параметров с периодом 0,1 – 0,5 сек (в зависимости от скорости роста температуры имитаторов твэлов при достижении кризисного состояния).

При проведении экспериментов момент наступления кризиса теплоотдачи определялся оператором стенда. Окончательно момент наступления кризиса теплоотдачи и точные параметры кризисного состояния устанавливались при посттестовой обработке записей САЭ.

Поскольку исследовался кризис теплоотдачи в стационарных условиях, обеспечивался плавный вход в кризисное состояние. Между набросами мощности при приближении кризиса теплоотдачи выдерживалась пауза ~1 мин, достаточная для того, чтобы убедиться, что температуры трубок пучка стабилизируются. Последние набросы мощности перед наступлением кризиса не превышали ~0,5% от ее текущей величины. При входе в кризисное состояние путем снижения расхода теплоносителя или давления или увеличения входной температуры теплоносителя скорость изменения этих параметров не превышала ~0,5%/мин от текущей величины параметра.

Результаты экспериментов

Эксперименты проведены в соответствии с матрицей (таблица 2) при следующих значениях определяющих параметров:

- абсолютное давление в конце зоны тепловыделения экспериментального участка p_{out} : 103,5; 124,1; 144,8 и 165,5 бар;
- массовая скорость теплоносителя G : 0678,2; 1017,2; 1356,3; 2034,5; 2712,6; 3390,8 и 4068,9 кг/(м²·с);
- температура теплоносителя на входе в зону тепловыделения t_{in} – от 120,6 до 327,8 °С.

Матрица экспериментальных исследований кризиса теплоотдачи

G кг/(м ² ·с)	p_{out} , бар (t_s , °C)							
	103,5 (313,3)		124,1 (327,2)		144,8 (339,4)		165,5 (350)	
	Номер режима	t_{in} °C	Номер режима	t_{in} °C	Номер режима	t_{in} °C	Номер режима	t_{in} °C
678,2			15	148,9	39	177,2	71	182,2
			16	122,2	40	151,1	72	151,7
					41	121,7	73	122,8
1017,2			17	148,3	42	231,7	74	232,2
			18	120,6	43	198,9	75	200,0
					44	173,9	76	175,0
					45	148,9	77	150,0
					46	121,7	78	122,2
1356,3			19	177,2	47	207,2	79	206,7
			20	121,7	48	190,0	80	183,3
					49	176,6	81	165,6
					50	151,7	82	140,0
					51	122,2	83	122,2
2034,5	1	207,8	21	252,3	52	275,6	84	234,4
	2	186,7	22	220,0	53	254,4	85	219,4
	3	179,4	23	208,9	54	216,1	86	201,1
	4	151,1	24	180,6	55	193,3	87	177,2
			25	150,0	56	150,0		
2712,6	5	227,8	26	282,8	57	299,4	88	300,6
			27	253,9	58	277,8	89	263,9
	6	203,3	28	231,7	59	260,0	90	240,6
	7	182,8	29	216,7	60	230,6	91	214,4
	8	161,1	30	192,2	61	204,4	92	181,1
3390,8			31	166,7	62	178,3	93	166,7
	9	300,6	32	301,7	63	327,8	94	322,2
	10	280,0	33	271,7	64	306,3	95	288,3
	11	274,4	34	248,9	65	260,0	96	257,8
	12	242,8	35	241,1	66	242,2	97	238,3
4068,9			36	204,4	67	204,4	98	218,3
	13	298,3	37	316,1	68	318,3	99	317,2
	14	281,7	38	296,1	69	305,6	100	299,4
					70	297,8		

При анализе экспериментальных данных расчет гидравлического сопротивления проводился по разработанной в РНЦ «Курчатовский институт» программе одномерного теплогидравлического расчета GT122 [1]. В программе реализована методика, которая основана на модели гомогенного двухфазного потока с учетом неравновесного пара, образующегося за счет поверхностного кипения, и проскальзывания пара относительно жидкой фазы.

Гидравлическое сопротивление анализировалось для 479-ти зафиксированных состояний (в том числе – для кризисных режимов).

В расчете полагалось, что имитаторы твэлов и обечайка канала (поверхность талькохлоритовых втулок) имеют одинаковую абсолютную шероховатость стенок, равную 5 микрометрам, что соответствует чистоте обработки поверхностей деталей при их

изготовлении. Коэффициенты гидравлического сопротивления дистрешеток задавались на основании информации, предоставленной заказчиком экспериментов.

Ошибка расчета полного перепада давления определялась по формуле:

$$\delta_{\Delta p} = \frac{(\Delta p)_{\text{exp}} - (\Delta p)_{\text{cal}}}{(\Delta p)_{\text{exp}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где $(\Delta p)_{\text{exp}}$ - экспериментальное значение полного перепада давления,

$(\Delta p)_{\text{cal}}$ - расчетное значение полного перепада давления.

Значения $\delta_{\Delta p}$ для всех участков измерения перепадов давления представлялись в зависимости от относительной энтальпии теплоносителя на выходе из пучка x_{out} . При отсутствии кипения в канале расчет удовлетворительно согласуется с экспериментом; для преобладающей части точек ошибка расчета составляет $\pm 5\%$. С ростом массового расходного паросодержания до 0,4 ошибка повышается до 15% (расчетный перепад давления занижен). Было отмечено повышение экспериментальных значений перепадов давления к концу экспериментов из-за образования отложений на поверхности имитаторов твэлов. Последнее связано с тем, что пучок находился длительное время (около 400 часов) в режиме кипения при высоких тепловых потоках и паросодержаниях.

В исследованиях кризиса теплоотдачи было зафиксировано 198 кризисных режимов. Важным моментом является то, что приблизительно в половине кризисных режимов ухудшение теплоотдачи возникало только на периферийных «холодных» имитаторах твэлов С1 – С16 (рис. 1), имеющих значительно более низкое (на 22%) тепловыделение, чем «горячие» имитаторы, а в остальной половине режимов – одновременно на «холодных» и на «горячих» имитаторах Н17 – Н25. Это означает, что возможности решеток-интенсификаторов, проявляющиеся в полной мере на центральных «горячих» имитаторах, не исчерпаны. Положительный эффект решеток-интенсификаторов «гасится» в периферийной зоне пучка. Поэтому необходимо признать, что для чистоты эксперимента (для проявления положительных качеств решеток-интенсификаторов в полной мере) следовало бы обеспечивать более высокое относительное тепловыделение имитаторов твэлов в центральной зоне пучка.

Аксиальная координата возникновения кризиса теплоотдачи изменялась с изменением режимных параметров и располагалась в диапазоне от 2100 до 3600 мм (от нижней границы зоны тепловыделения).

На рис. 4 экспериментальные значения критических мощностей сравниваются с расчетными мощностями, определенными на основании попятных расчетов, которые выполнены по программе SC-1 [2] с использованием для определения критических тепловых потоков методики ОКБ «Гидропресс» с форм-фактором для учета аксиальной неравномерности тепловыделения [3]. В данном случае эта методика рассматривается в качестве обобщенного представления экспериментальных данных, полученных на моделях ТВС реакторов типа ВВЭР.

В проведенных расчетах кризис теплоотдачи при всех сочетаниях режимных параметров возникал на центральном имитаторе твэла. Отклонения расчетных значений критических мощностей N_{cal} от экспериментальных значений N_{exp}

$$\delta = (N_{\text{exp}} - N_{\text{cal}}) / N_{\text{exp}} \cdot 100\% \quad (3)$$

нанесены в зависимости от массовой скорости G . Имеющийся на рисунке 4 разброс данных по вертикали связан с тем, что на один график нанесены экспериментальные точки, полученные при разных входных температурах и давлениях. Видно, что с ростом массовой скорости средняя величина δ возрастает от ~ 0 до 20 - 25%. Заметим, что максимальные значения массовой скорости соответствуют рабочим режимам реакторов ВВЭР-1000 и PWR.

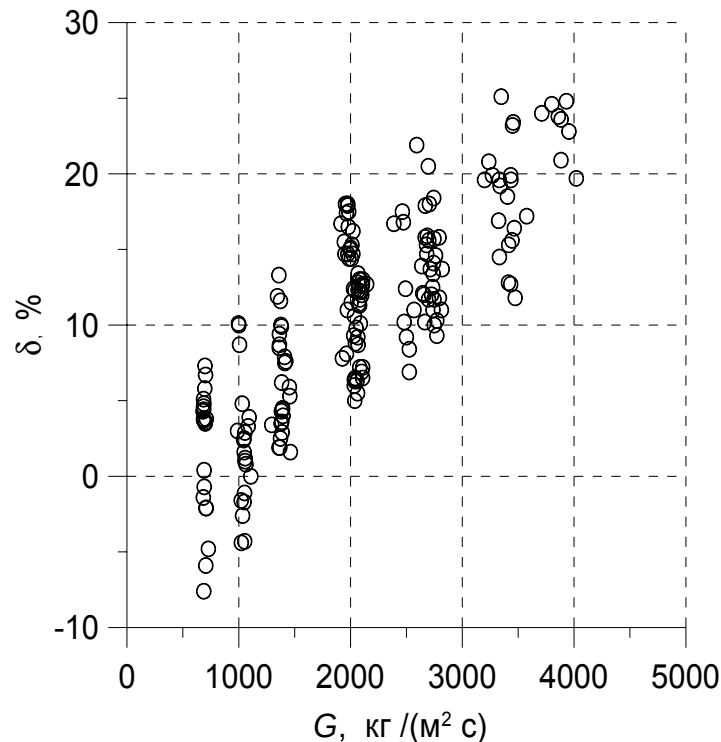


Рис. 4. Зависимость величины δ (выражение (3)) от массовой скорости теплоносителя G

Основным фактором, обуславливающим повышение экспериментальных значений критических мощностей по сравнению с расчетными значениями, является увеличение эффекта интенсификации перемешивания теплоносителя и теплообмена с ростом массовой скорости за счет специальных конструктивных элементов дистрешеток, что, разумеется, не учитывается методикой ОКБ «Гидропресс» и другими методиками, созданными для расчетов реакторов типа ВВЭР, в которых таких элементов нет.

Заключение

В результате анализа экспериментальных данных, полученных в широком диапазоне режимных параметров для 25-стержневой модели ТВС реактора типа PWR с удвоенным количеством решеток-интенсификаторов, можно сделать приведенные ниже выводы.

- При отсутствии кипения в канале расчет полных перепадов давления, выполненный по методике, которая используется для реакторов типа ВВЭР, удовлетворительно согласуется с экспериментом. Для преобладающей части точек ошибка расчета составляет $\pm 5\%$. С ростом паросодержания до 0.4 ошибка повышается до 15% (расчетный перепад давления занижен). Подобные результаты ранее были получены при анализе экспериментальных данных для моделей ТВС реакторов типа ВВЭР.
- Экспериментальные значения критических мощностей, полученные при характерных для рабочих режимов реакторов типа ВВЭР и PWR массовых скоростях теплоносителя, превышают на 20 - 25% расчетные значения, полученные по почечковой программе SC-1 с использованием для определения критических тепловых потоков методики ОКБ «Гидропресс», предназначенной для расчета реакторов типа ВВЭР. Это превышение можно рассматривать как выигрыш ТВС реактора PWR у ТВС реактора ВВЭР-1000 в запасе до кризиса теплоотдачи. Следует подчеркнуть, что речь идет о выигрыше в мощности, а не в запасе до кризиса теплоотдачи.

- Полученный результат показывает, что для повышения экономических показателей реакторов типа ВВЭР целесообразно внедрение в ТВС решеток-интенсификаторов.
- При экспериментальном исследовании моделей ТВС реакторов типа ВВЭР с решетками-интенсификаторами необходимо проведение части исследований с моделированием аксиальной неравномерности тепловыделения.

Список обозначений

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

G – массовая скорость теплоносителя, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

N – критическая мощность, кВт;

p_{out} – давление на верхней границе зоны тепловыделения, бар;

t_{in} – температура теплоносителя на входе в экспериментальный участок, $^{\circ}\text{C}$;

t_s – температура насыщения, $^{\circ}\text{C}$;

Δp – полный перепад давления по длине канала, бар;

x_{out} – относительная энтальпия на верхней границе зоны тепловыделения.

Индексы:

cal – расчетное значение;

exp – экспериментальное значение.

Список литературы

1. Программа GT122: Одномерный теплогидравлический расчет отдельных ТВС реакторов ВВЭР, частей активной зоны и активной зоны в целом в стационарных условиях. Регистрационный номер паспорта: 130 от 12.04.2001 г.
2. Кобзарь Л.Л., Олексюк Д.А. Развитие и верификация программы SC-1, предназначенной для пучечкового теплогидравлического расчета активных зон ВВЭР. Сб. докладов на 2-й Всероссийской научно-технической конференции “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, Подольск, 2001.
3. Астахов В.И. и др. Исследование влияния профиля тепловыделения по длине на кризис теплообмена в пучках стержней. Сб докладов на семинаре ТФ-78 «Теплофизические исследования для обеспечения надежности и безопасности ядерных реакторов водородного типа», Будапешт, 1978.